
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Septiembre 2020 • N.º 528 • 6,90 € • investigacionyciencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN
LAS VÍAS IMPREVISTAS DEL APRENDIZAJE
Descubren nuevos mecanismos cerebrales implicados en el procesamiento de la información
GENÓMICA
El método que está revolucionando la biología celular
ASTRONOMÍA
Imágenes que revelan planetas ocultos
ARQUEOLOGÍA
La conquista agrícola de Europa
VÍAS IMPREVISTAS DEL APRENDIZAJE | PLANETAS OCULTOS | LA CONQUISTA AGRÍCOLA DE EUROPA
SEPTIEMBRE 2020 N.º 528
00528
9 770210 136004

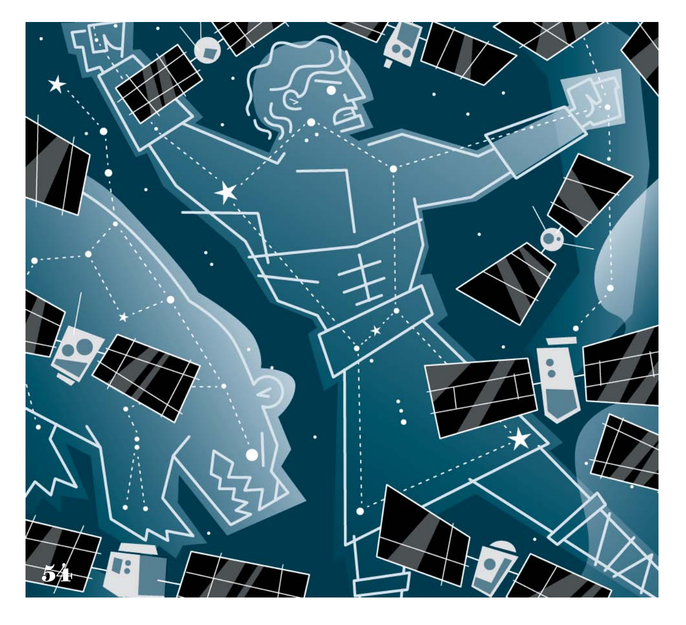


IGOR SIWANOWICZ

ARTÍCULOS



15



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

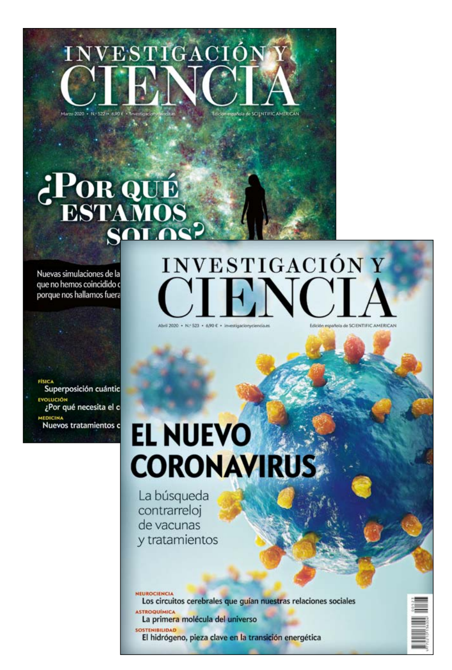
SECCIONES

EN PORTADA



Tradicionalmente se pensaba que el aprendizaje se producía en las sinapsis, el espacio de interconexión entre las neuronas. Pero después se ha visto que las sinapsis por sí solas no bastan. Varios estudios novedosos han desvelado que la mielina, la vaina que rodea los axones de las neuronas, experimenta cambios fundamentales que influyen en el modo en que adquirimos y almacenamos los conocimientos. Ilustración de Getty Images/ktsimage/iStock.

redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo y abril de 2020

PLANETA PERDIDO

En «Una solución a la paradoja de Fermi» [Investigación y Ciencia, marzo de 2020], Caleb Scharf argumenta que el hecho de que hasta ahora no hayamos encontrado indicios de otras civilizaciones en la Vía Láctea probablemente se deba a que nuestro planeta se halla apartado de las rutas de exploración galácticas.

Para mí, la pregunta clave es si H. G. Wells estaba en lo cierto y nuestro ecosistema acabaría aniquilando a posibles invasores, o si son ellos quienes tendrían ventaja. Aún ignoramos si la vida en la Tierra surgió de manera espontánea a partir de materia inerte o si evolucionó en otro lugar y se propagó desde allí. En este último caso, el modelo de Scharf suena aterrador, ya que habríamos quedado aislados en un rincón de la galaxia y, por tanto, seríamos vulnerables a una inmensa variedad de patógenos.

J. Gunn Coolidge
Chevy Chase, Maryland

El artículo de Scharf presupone que la vida tecnológica es algo común, pero esa idea nos dice más sobre nosotros mismos que sobre el universo. La vida surgió muy rápido en la Tierra y los procariotas medraron a pesar de los caprichos del entorno. La vida compleja, en cambio, apareció una sola vez, lo que indica que se trata de un evento extremadamente improbable.

James Fradgley Wimborne
Inglaterra

Responde Scharf: *Uno de los grandes retos a la hora de abordar la pregunta de «¿dónde está todo el mundo?» es que enseguida nos vemos empujados a considerar todo tipo de prerrequisitos que se nos antojan imprescindibles. Y el problema es que no sabemos cómo ponderar su importancia, ya que nuestros sesgos terrestres siempre se interponen en el camino. El modelo que describo en el artículo intenta reducir todo a una sola premisa sencilla y con soporte empírico. Creo que es bueno que el modelo esté incompleto: constituye una especie de mínimo teórico, un punto de partida, dentro de una amplia variedad de posibilidades cósmicas. De hecho, puede —y espero— que sea desarrollado en el futuro para evaluar cuantitativamente los efectos de cualesquiera suposiciones adicionales.*

PÁJAROS ANTE EL ESPEJO

En «La sorprendente inteligencia de las aves» [Investigación y Ciencia, abril de 2020], Onur Güntürkün afirma que su estudio con urracas supuso la primera demostración de que las aves podían autorreconocerse en un espejo. Esto es simplemente falso. Hace casi cuatro décadas, yo y mis colaboradores, entre ellos el afamado psicólogo de Harvard B. F. Skinner, publicamos un artículo en *Science* que describía el mismo tipo de comportamiento en las palomas [«"Self-Awareness" in the pigeon»; R. Epstein, R. P. Lanza y B. F. Skinner en *Science*, vol. 212, 1981]. Las aves usaron un espejo para localizar un punto en su cuerpo que no podían ver directamente. Aunque este tipo de comportamiento ha sido tradicionalmente atribuido al autorreconocimiento o a otros procesos cognitivos, nuestro experimento sugería una componente ambiental.

Por otro lado, se sabe que hay diferentes grados de propiocepción o autorreconocimiento. Por ejemplo, en nuestro artículo no incluimos que las palomas atacaron su propio reflejo. Y, de hecho, incluso los humanos somos a veces tan ajenos a ciertos aspectos de nosotros mismos como lo eran aquellos pájaros.

Robert Lanza
Universidad Wake Forest

Responde Güntürkün: *No creo que el estudio de Lanza, ni una replicación exitosa publicada en 2014 por investigadores japoneses, demuestre una capacidad de autorreconocimiento en las palomas.*

El condicionamiento operante puede hacer que un animal se comporte de varias maneras. En ambos experimentos, las palomas fueron condicionadas paso a paso para picotear un punto en su cuerpo que solo podían ver en el espejo. En el trabajo de Lanza, ello se logró después de entrenar primero a las aves para que picotearan puntos visibles en su cuerpo, luego para que picoteasen puntos en la pared, y por último para que llevaran a cabo varios pasos intermedios en los que intervenía un espejo.

Dicho procedimiento es completamente distinto del empleado con simios, elefantes y urracas. En este caso se deja que los animales se habitúen al espejo durante unas horas, durante las cuales no reciben entrenamiento para tocar su cuerpo ni para prestar atención a las marcas. Después, se les hacen las marcas y se observa cómo reacciona el animal.

En nuestro estudio con urracas usamos varias condiciones de control (sin espejo, así como una marca negra que no era visible para los pájaros). Las urracas nunca fueron condicionadas para rascarse el área bajo el pico, para prestar atención a la marca ni para mirar detrás del espejo, sino que actuaron de manera espontánea. Esta es una diferencia fundamental entre nuestro trabajo y el de Lanza, por lo que uno y otro exigen interpretaciones distintas. Por poner un ejemplo extremo, podríamos condicionar a un mono para que escribiera «ser o no ser», pero eso no debería hacernos inferir que el animal está reflexionando sobre los clásicos de la literatura universal.

Estoy de acuerdo con Lanza en que posiblemente haya diferentes grados de propiocepción o autorreconocimiento. Pero no creo que condicionar a los animales pueda ayudar a resolver la cuestión.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Los anillos de crecimiento de la madera antigua sirven para calibrar la datación por radiocarbono.

ARQUEOLOGÍA

Dataciones más precisas

Un ajuste en el método de datación por radiocarbono podría ayudar a determinar fechas controvertidas

Hace más de 3500 años, una catastrófica erupción volcánica sacudió la isla de Thera, conocida hoy como Santorini. Una lluvia de cenizas y pumita cayó sobre el Mediterráneo, y los tsunamis alcanzaron las lejanas costas de Creta. En la década de 1960, los arqueólogos descubrieron en Santorini un asentamiento minoico congelado en el tiempo, con casas de varios pisos decoradas con vistosos frescos y enterradas bajo los escombros volcánicos.

La erupción fue una de las mayores explosiones volcánicas de los últimos 10.000 años y marcó un momento crucial en la Edad del Bronce mediterránea. También suscita gran controversia entre los arqueólogos, que debaten desde hace décadas sobre la fecha en que se produjo el cataclismo.

Aunque no zanja la cuestión, un reciente ajuste del método de datación por radiocarbono restringe las posibilidades. Esta nueva y esperada curva de calibración (un conjunto de datos que sirven para convertir los resultados de la datación por radiocarbono en fechas del calendario) aparece publicada en el número especial de agosto de *Radiocarbon*. Bautizada como IntCal20, se basa en casi el doble de datos que la anterior curva de 2013 y podría obligar a los científicos a reevaluar la edad de yacimientos, objetos y sucesos a lo largo del planeta.

«Se han añadido muchísimos datos, y nuestra capacidad de fechar el pasado con certeza aumenta con cada revisión», señala Thomas Higham, experto en datación por radiocarbono de la Universidad de Oxford, que no participó en el proyecto de calibración. «Muchos cientí-

STEFAN DINSE/ALAMY

ficos están entusiasmados con la nueva curva, porque nos permitirá afinar nuestros estudios cronológicos y entender mejor cómo ha cambiado la Tierra a lo largo del tiempo.»

Todos los seres vivos absorben carbono 14, un isótopo radiactivo del carbono que se desintegra a un ritmo constante. Eso significa que las conchas, los huesos, el carbón y otros materiales orgánicos hallados por los arqueólogos están fechados químicamente. Descubierta a finales de la década de 1940, la datación por radiocarbono transformó el estudio de la prehistoria y se convirtió en el patrón oro para determinar fechas en arqueología. La segunda revolución llegó cuando los científicos comprendieron que la concentración atmosférica de carbono 14 va variando como resultado de las fluctuaciones en la actividad solar (y también a causa de las bombas atómicas y la quema de combustibles fósiles, en el pasado reciente). Eso obliga a calibrar las dataciones por radiocarbono con datos independientes, que proceden sobre todo de la madera antigua, cuyos anillos de crecimiento anual guardan relación directa con los años naturales y también pueden analizarse con radiocarbono.

Cuando se elaboraron las primeras curvas de calibración aceptadas a nivel mundial, en la década de 1980, los datos de anillos anuales se limitaban a los últimos milenios. En cambio, los que emplea IntCal20 abarcan casi 14.000 años y son mucho más numerosos que en versiones anteriores, lo cual permite observar picos puntuales en fenómenos como las fulguraciones solares. Otras mediciones absolutas obtenidas a partir de registros naturales como los testigos de hielo, los sedimentos lacustres y las estalagmitas de las cuevas, extienden la nueva curva a los últimos 55.000 años, cerca de la máxima edad que permite determinar el radiocarbono.

El Grupo de Trabajo Internacional sobre Calibración, formado en 2002, reúne datos a través de la colaboración masiva a fin de generar nuevas versiones de esta curva ampliamente utilizada. IntCal20 está pensada para muestras del hemisferio norte, pero el grupo también ha creado otras curvas para los objetos del hemisferio sur y del océano, que presentan concentraciones de radiocarbono ligeramente distintas.

De los 12.904 datos sin procesar que incluye IntCal20, más de 800 proceden del período comprendido entre 1700 y 1500 a.C., la parte prehistórica de la curva que está mejor datada. Los científicos saben que la erupción de Thera se produjo en esa época, pero quieren determinar el momento exacto.

«Disponer de una fecha precisa y fiable para este evento implicaría que, en cualquier yacimiento arqueológico de la región donde halláramos las cenizas, tendríamos un estrato perfectamente datado», explica Charlotte Pearson, experta en dendrocronología de la Universidad de Arizona, que participó en la elaboración de IntCal20 y estudia Thera. «Eso permitiría ordenar las cronologías de las increíbles culturas de esa región», como los minoicos, los hititas, los hicsos y los antiguos egipcios.

Pero determinar la fecha de la erupción no es sencillo. Algunos restos de cerámica y otros objetos apuntan a finales del siglo XVI a.C., mientras que los resultados del radiocarbono la sitúan al menos un siglo antes. Los datos integrados en IntCal20 ayudan a precisar un poco más, pero no ofrecen una respuesta definitiva, sino las probabilidades de algunas ventanas temporales, debido a que la curva se aplana en ese período.

«La principal diferencia es que los posibles intervalos se han reducido bastante», comenta Sturt W. Manning, arqueólogo de la Universidad Cornell que dirigió los primeros estudios con radiocarbono en Thera y participó en el proyecto IntCal20. La calibración sitúa la fecha más probable a finales del siglo XVII a.C., con otra posible ventana entre comienzos y mediados del siglo XVI a.C., añade Manning. Gracias a los nuevos datos, la fecha estimada «es mucho más precisa, aunque, irónicamente, el debate no ha cambiado». No obstante, Pearson cree que los científicos están cerca de determinar el año en que tuvo lugar el evento. «Creo que es posible datarlo», asegura. «La cuestión es qué vestigio aportará la prueba concluyente.»

OCEANOGRAFÍA

Rescate de náufragos

Un algoritmo ayuda a encontrar personas desaparecidas en el mar

Cuando un barco se hunde o se pierde en el mar, los equipos de rescate a menudo recurren a modelos informáticos para delimitar la zona en la que buscar supervivientes. Los modelos actuales combinan datos de satélite y de sensores oceánicos para prever la trayectoria de un objeto a la deriva y generar mapas de las áreas donde es más probable encontrarlo. Si la batida inicial no tiene éxito, esa información se incorpora al modelo y se actualizan las predicciones.

Ahora, un equipo de investigadores ha desarrollado un algoritmo para predecir la ubicación de los objetos a la deriva durante las tres primeras horas de una búsqueda. En vez de modelizar la trayectoria de una persona desaparecida, la herramienta identifica los denominados «perfiles de atracción transitoria» (PAT), zonas del agua adonde son arrastrados los objetos cercanos por la acción conjunta de las olas y las corrientes. Tener en cuenta estos atractores en las primeras horas de una operación de búsqueda y rescate podría resultar crucial para salvar vidas.

El movimiento de las aguas oceánicas se puede representar matemáticamente mediante un campo de velocidades, que en este caso describe la velocidad y dirección del agua en cada punto de la superficie. El nuevo algoritmo, presentado en mayo en *Nature Communications*, emplea modelos que predicen ese campo y datos del oleaje para hallar las zonas con mayor atracción. Aunque estos PAT son invisibles en el agua, podemos representarlos en un mapa: cada uno corresponde a una curva de entre unos 100 y 1000 metros de longitud. A medida que cambian las condiciones superficiales, los PAT se desplazan lo bastante despacio como para arrastrar objetos con ellos; actuarían de



Experimento para comprobar las predicciones sobre objetos a la deriva.

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS

modo similar a un imán que se desliza bajo una mesa y mueve las monedas que hay sobre ella.

El equipo puso a prueba su método arrojando maniquís con dispositivos GPS a las turbulentas aguas situadas al sur de Martha's Vineyard, una isla de Massachusetts. Cada maniquí siguió una trayectoria distinta, pero «todos se acumularon en el mismo PAT», justo como había pronosticado el algoritmo,

Los científicos esperan que IntCal20 provoque una avalancha de nuevos estudios para recalibrar datos, y no solo de la Edad del Bronce. La nueva curva retrasa 50 años el período de transición que siguió a la última glaciación, lo que podría afectar a la interpretación de los datos relacionados con la extinción masiva de la megafauna o la llegada del ser humano al continente americano, eventos cuya fecha tampoco está clara. IntCal20 también sugiere que el fósil más antiguo de *Homo sapiens* que se conoce en Eurasia, el hombre de Ust'-Ishim hallado en Siberia, podría ser 1000 años más joven de lo que se pensaba. Higham se muestra especialmente optimista respecto a los nuevos datos de hace entre 50.000 y 55.000 años: espera que nos permitan entender mejor el modo en que los humanos anatómicamente modernos que emigraron de África interactuaron e intercambiaron genes con humanos arcaicos como los neandertales o los denisovanos.

Según Manning, la próxima versión de IntCal incorporará más variaciones regionales en las mediciones de radiocarbono, que podrían explicar las discrepancias observadas en el período asociado a la erupción de Thera. «Hemos alcanzado un nuevo nivel de exactitud y precisión», concluye. «Eso despertará un renovado interés por saber exactamente qué se ha datado y cómo se ha calculado su edad.»

—Megan I. Gannon

explica Mattia Serra, investigador de la Universidad Harvard y primer autor del estudio. Esos experimentos se realizaron cerca de la costa, pero los cálculos respaldan la existencia de PAT en mar abierto.

Lawrence Stone, responsable científico de la firma de consultoría Metron y diseñador principal del protocolo de búsqueda y rescate de la Guardia Costera estadounidense, celebra estos «fascinantes e impresionantes resultados». El estudio «encaja a la perfección con el tipo de cosas que queremos hacer y es una buena investigación científica, con resultados sólidos», señala Stone, que no participó en el proyecto. «Tenemos que incluirlos.»

Stone recalca que la herramienta para localizar PAT no reemplazaría los modelos existentes, sino que los complementaría. La Guardia Costera asegura que está trabajando para incorporar las curvas de los PAT a sus mapas predictivos. Mientras, Serra y sus colaboradores pretenden incluir los efectos del viento y de la flotabilidad para mejorar sus pronósticos.

—Scott Hershberger

MEDIOAMBIENTE

El movimiento del hielo marino

Los collares GPS perdidos por los osos polares permiten rastrear las placas

Cuando un científico le pone un collar de rastreo GPS a un oso polar, no hay garantías de que el animal vaya a conservarlo mucho tiempo. De hecho, esos enormes collares son holgados para que los osos puedan quitárselos si les molestan. Ahora, los científicos han encontrado una manera de aprovechar las señales que emiten los dispositivos desechados.

«Podría pensarse que esos collares caídos no sirven para nada», apunta Natasha Klappstein, investigadora de osos polares de la Universidad de Alberta. Sin embargo, ella y sus colaboradores han empleado los datos de los collares abandonados sobre la banquisa de la bahía de Hudson, en Canadá, para estudiar los desplazamientos del hielo marino.

Para su estudio, publicado en junio en *The Cryosphere*, los investigadores identificaron 20 collares que permanecieron activos entre 2005 y 2015, y cuyos movimientos no se correspondían con los de los osos, sino con la deriva del hielo. Sus mediciones de cómo se desplaza el hielo en la bahía de Hudson son únicas: no existen sensores fácilmente accesibles sobre el terreno y las observaciones de satélite no suelen captar con precisión el avance de las placas más pequeñas.

El equipo comparó los movimientos de los collares perdidos con las predicciones de un modelo de la deriva del hielo, elaborado por el Centro Nacional de Datos sobre la Nieve y el Hielo (NSIDC) de EE.UU. Los datos de los collares indican que dicho modelo, de uso generalizado, subestima la velocidad a la que se desplaza el hielo en la bahía de Hudson, así como el alcance total de la deriva. En cuestión de meses, la posición real de una placa de hielo puede desviarse varios cientos de kilómetros de la dada por el modelo, según los investigadores.

Eso significa que a los osos podría costarles más de lo que pensábamos moverse en sentido opuesto al avance del hielo: «Si estamos subestimando la velocidad de la deriva, puede que también infravaloremos la energía invertida por los osos», incide Ron Togunov, doctorando de la Universidad de la Columbia Británica y primer autor del estudio.

La investigación también revela detalles sobre el hielo de mayor movilidad. A medida que aumente la fusión, ese tipo de hielo se extenderá más al norte, hasta el Ártico central, explica Andy Mahoney, geofísico de la Universidad de Alaska en Fairbanks ajeno al estudio. Los científicos ya sabían que el modelo del NSIDC podía subestimar la velocidad del hielo, añade, pero «siempre es positivo identificar y subsanar lagunas en los datos».

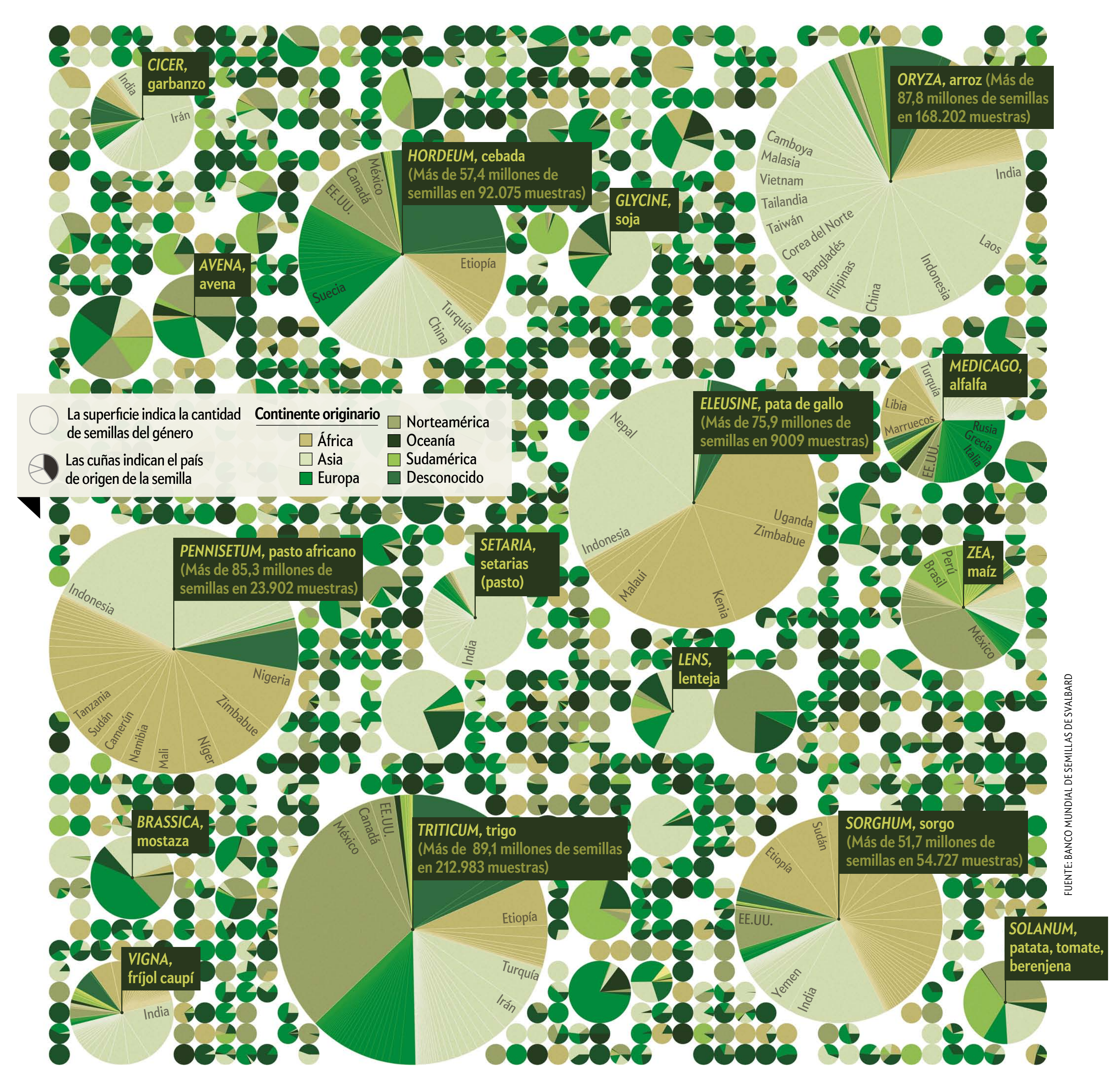
Los nuevos resultados también podrían mejorar las predicciones sobre la dispersión de los vertidos de petróleo u otros contaminantes en aguas repletas de hielo flotante, asegura Walt Meier, investigador principal del NSIDC que tampoco participó en el proyecto. Los hallazgos podrían incluso influir en los futuros modelos del NSIDC. «Son datos realmente interesantes», valora Meier, «y sin duda los tendremos en cuenta».

—Chris Baraniuk



Un oso polar con collar GPS y sus cachorros.

ANDREW DEROCHER, UNIVERSIDAD DE ALBERTA



Texto de Mark Fischetti | Gráfico de Accurat (G. Magni, S. Guerra, A. Autuori y L. Mattiazzi)

BOTÁNICA

Un millón de semillas

Una cámara congelada en el Ártico atesora muestras originarias de casi todos los países

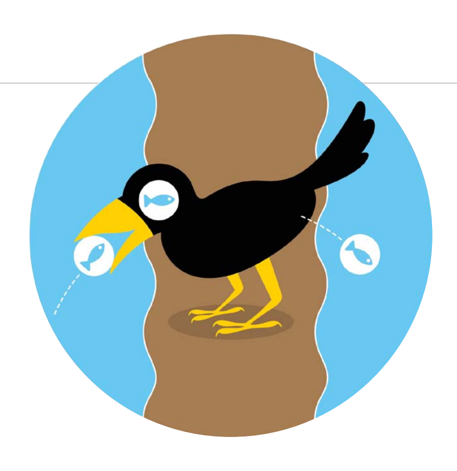
Al Banco Mundial de Semillas de Svalbard han llegado recientemente semillas de 33 países, lo cual eleva el total de muestras almacenadas hasta 1.050.000. Cada una consta de un puñado de semillas pertenecientes a un genotipo. Las muestras permanecen guardadas en estanterías repartidas en grandes galerías que se internan cien metros en el corazón de una montaña cubierta de hielo y permafrost, en la remota isla de Spitsbergen, en el Ártico noruego. Cerca de 87 bancos de germoplasma usan la cámara como almacén para sus semillas, procedentes de multitud de países y de las tribus ancestrales. Son importantes especies de cultivo o de pastos, parientes silvestres de estas y especies experimentales de los fitomejoradores que podrían incrementar la productividad o la resistencia vegetal —básicamente como una reserva para el suministro de alimentos ante la amenaza del cambio climático y la pérdida de biodiversidad—. El suelo congelado mantiene la cámara a −3 °C, temperatura que los sistemas de refrigeración rebajan hasta −18 °C.

Más de 500 especies custodiadas en la cámara
Entre 300 y 500 semillas, o más, por muestra
Depositarios: 87 bancos de germoplasma de todo el mundo

BIOLOGÍA

Huevos polizones

Los huevos de los peces eclosionan después de haber sido engullidos y excretados por un pato



Desde hace siglos, los naturalistas especulaban con que los huevos de los peces alcanzaban los lagos y estanques aislados como polizones en el plumaje o las patas de las aves. Pero según un artículo publicado en junio en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, el modo de transporte de al menos una parte podría ser mucho más íntimo: el nuevo estudio aporta la primera prueba de que de los huevos de pez que han atravesado el tubo digestivo de un ave todavía pueden nacer larvas sanas.

«Nadie había pensado antes en las entrañas de las aves porque creo que es bastante absurdo», afirma uno de los autores, Orsolya Vincze, ecóloga en el Instituto de Investigaciones del Danubio, en Debrecen, Hungría. «Teníamos la esperanza de hacer algún hallazgo, pero aun así pensábamos que era bastante improbable.» En 2019, se obtuvo una larva sana de un huevo de kili (*Aplocheilidae*) encontrado en excrementos de cisne, pero estos huevos son extraordinariamente tenaces y resisten largos períodos de deshidratación.

Vincze y sus colaboradores plantearon que otros huevos ordinarios también sobrevivirían a la ingesta cuando el autor principal del estudio, Ádám Lovas-Kiss, observó que algunas partes blandas vegetales permanecían vivas en las excretas aviares.

Para demostrar su corazonada, adquirieron ocho ánades azulones a un criador local y huevos fecundados de dos especies de carpa de un instituto de acuicultura. Obligaron a cada pato a ingerir tres gramos de huevos de ambas especies (medio millar por ración) en sendos experimentos. El examen de las heces reveló 18 huevos intactos, que depositaron en un acuario. Doce contenían embriones viables y de tres nacieron alevines normales.

«A mi parecer, esta investigación revela que hay cuestiones científicas de las que es posible sacar resultados esclarecedores con diseños experimentales sencillos, fácilmente comprensibles y reproducibles», matiza Tibor Hartel, ecólogo en la Universidad de Babes-Bolyai, en Rumanía, ajeno al estudio.

Vincze y sus colaboradores sospechan que el porcentaje de éxito debe ser superior en la naturaleza, pues las condiciones son más propicias para que los huevos conserven la viabilidad; esperan someter a prueba esta idea en experimentos futuros. También planean estudios prospectivos con más especies de peces.

—Rachel Nuwer

MEDICINA

Una pastilla contra las picaduras de serpientes

El fármaco, diseñado para combatir intoxicaciones por metales, serviría como primer auxilio

Un fármaco destinado a tratar el envenenamiento con metales pesados podría brindar un tiempo precioso a quien sufriera una picadura de serpiente venenosa. En un estudio que vio la luz el pasado mayo en *Science Translational Medicine*, los autores demostraron que la administración oral del medicamento mitiga el efecto del veneno de víbora en los ratones.

Las víboras de escamas aserradas (*Echis* sp.) constituyen un género de ofidios venenosos y agresivos de Asia y África, donde hay regiones densamente pobladas con escaso acceso a centros médicos modernos. «De todas las serpientes del mundo, posiblemente sean las causantes de más picaduras y muertes», asegura Abdulrazaq Habib, médico especialista en enfermedades infecciosas y tropicales de la Universidad Bayero de Kano, Nigeria, ajeno al estudio. El veneno de la víbora destruye los tejidos circundantes a la mordedura, lo que puede exigir la amputación del dedo, de la extremidad o incluso provocar la muerte.

La ponzoña contiene una serie de enzimas tóxicas, metaloproteasas, que dependen de iones de cinc para desempeñar su función y causan daños en los tejidos y hemorragias internas. «Planteamos la hipótesis de que la captura de esos iones inhibiría la actividad de la toxina y neutralizaría sus efectos nocivos», explica Laura-Oana Albulescu, bioquímica de la Escuela de Medicina Tropical de Londres (LSTM) y autora principal del nuevo estudio. Ella y sus colaboradores investigaban tratamientos contra el envenenamiento con metales pesados, basados en compuestos que atrapan los iones metálicos. «Esperamos que este estudio saque a relucir la posibilidad de usar fármacos orales como primeros auxilios contra las picaduras de serpiente, una idea que se ha barajado antes sin que llegase a cuajar», explica Albulescu.

Las pruebas de laboratorio revelaron que una familia de tres fármacos puede inhibir la acción de la toxina de varias víboras *Echis*. A continuación, evaluaron cada fármaco en ratones a los que se había inyectado una dosis letal del veneno de la víbora de África oriental (*Echis carinatus*). El unitiol salvó a todos los ratones cuando se administró 15 minutos después de la inyección del veneno, seguido al cabo de una hora por la inyección de una dosis de antídoto. Ni el fármaco ni el antídoto bastaron por sí solos para salvar a todos los ratones envenenados, explica Albulescu. Los resultados indican que el unitiol podría servir como un remedio de primeros auxilios contra la picadura; concedería tiempo para el traslado al hospital, donde se recibiría el tratamiento definitivo. «Después de estudiar varias situaciones que podrían darse en la práctica, los resultados obtenidos son alentadores», afirma Habib.

Con un coste de 10 dólares por comprimido, el fármaco resulta mucho más barato que el antídoto y ya se considera seguro en otras indicaciones, afirma Nicolas Casewell, uno de los autores del estudio y experto en venenos del LSTM. Los investigadores prevén iniciar los ensayos clínicos en seres humanos el año que viene para comprobar la seguridad y la tolerabilidad del fármaco en poblaciones africanas, que son las principales víctimas de los ataques de estas víboras. Esperan que en un par de años el unitiol se convierta en la primera «píldora contra picaduras de serpiente» del mundo.

—Harini Barath

THOMAS FUCHS

TECNOLOGÍA

Papel antiincendios

Un barato sensor impreso en papel podría transmitir alertas de incendio



Incendio en el parque nacional Pike, en Colorado.

Los incendios forestales son cada vez más devastadores y en los últimos tiempos han arrasado regiones de todo el mundo. Para intentar mitigar los daños, un equipo de investigación dirigido por Yapei Wang, químico en la Universidad Renmin de China, ha desarrollado un sensor de bajo coste que facilita la detección temprana de los fuegos.

Los métodos de detección actuales dependen mucho de la vigilancia humana, lo que puede retrasar la llegada de una respuesta eficaz. La población civil es quien avisa de la mayoría de los incendios, mientras que otras alertas proceden de patrullas a pie y observadores en torres de vigilancia. En contadas ocasiones también los avistan aviones y satélites, aunque, como recuerda Wang, «el fuego aparece en la superficie: cuando lo vemos desde el cielo, ya es demasiado tarde».

El equipo explica que el nuevo sensor puede instalarse cerca de la base del tronco de los árboles y enviar una señal inalámbrica a un receptor próximo si se produce un gran aumento de temperatura. El propio calor suministra energía al detector, así que no es necesario cambiar la batería. La clave reside en unas sales fundidas denominadas líquidos iónicos: cuando la temperatura cambia bruscamente, los electrones se mueven en el interior de esos líquidos y generan la energía eléctrica que permite a los electrodos emitir la señal. Los investigadores imprimieron las sustancias en papel corriente y lograron crear un sensor por tan solo 0,40 dólares, como describieron en junio en *ACS Applied Materials & Interfaces*.

Jessica McCarty, geógrafa de la Universidad Miami ajena al proyecto, afirma que lugares como San Diego (donde las áreas silvestres llegan hasta la ciudad) podrían beneficiarse de un detector así. Según la investigadora, si un incendio declarado en un cañón se extendiera hasta una vivienda, gracias a este tipo de dispositivos «el propietario se enteraría antes que los bomberos».

Pero Graham Kent, sismólogo de la Universidad de Nevada en Reno que tampoco participó en el estudio, opina que hay algo aún más importante: mejorar la coordinación entre las diferentes agencias implicadas en la lucha contra el fuego. Kent es el director de ALERTWildfire, una red que emplea cámaras y métodos de colaboración masiva para detectar incendios en California, Nevada y Oregón. «La respuesta a un incendio es como un *ballet*», compara, «y habría que coreografiarla» desde la detección, confirmación y envío de unidades hasta la extinción, para distribuir los recursos en el lugar y momento adecuados. «La detección solo es el primer paso. Si luego salen mal los pasos del 2 al 98, toda esa tecnología no sirve de nada.»

Wang revela que su equipo pretende ampliar el alcance de la señal del detector más allá de los 100 metros actuales (una distancia que podría limitar la utilidad del dispositivo) y desarrollar un blindaje para protegerlo. Y McCarty observa que también hay que probarlo sobre el terreno.

—*Karen Kwon*

GETTY IMAGES/MILEHIGHTRAVELER/ISTOCK

Erratum corrige

En la versión impresa del artículo «**¿Por qué hay materia en el universo?**» de Silvia Pascoli y Jessica Turner (Investigación y Ciencia, agosto de 2020), se omitió la siguiente bibliografía:

PARA SABER MÁS

Violation of *CP* invariance, *C* asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. Andréi Sájarov en *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 5, págs. 24-27, 1967.
Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Colaboración T2K en *Physical Review Letters*, vol. 112, artículo n.° 061802, febrero de 2014.
Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. Colaboración T2K en *Nature*, vol. 580, págs. 339-344, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la materia. James M. Cline en *IyC*, junio de 2005.
Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.
El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz en *IyC*, diciembre de 2017.



Las alas de las cigarras son hidrófugas y bactericidas.

BIOLOGÍA

Las asombrosas alas de la cigarra

La química y la física se conjugan para dotar a este insecto de unas alas con propiedades especiales

La naturaleza sirve de fuente de inspiración para la ingeniería. Un ejemplo: hace tiempo que las alas de las cigarras (cicadélidos) asombran a los especialistas por sus propiedades hidrófobas y antimicrobianas, unos rasgos que interesaría reproducir en productos manufacturados. Pero estudios previos en que se extraían por completo las sustancias de la superficie de las alas a veces las dañaban y brindaban una visión incompleta del modo en que dichas sustancias interactúan con la estructura de estos apéndices. Ahora, en un nuevo estudio se ha analizado el recubrimiento alar de las cigarras capa a capa, lo que ha revelado una interacción compleja entre la conformación física y la química.

Se han estudiado dos especies de cigarra que poseen en las alas un patrón muy ordenado de minúsculas estructuras en forma de cono llamadas nanopilares. Trabajos precedentes habían sugerido que los nanopilares contribuyen a la capacidad para repeler el agua y al efecto microbiocida.

Para no dañarlas, el equipo probó con la extracción facilitada por microondas, un método hasta entonces inédito en alas intactas de insectos, afirma Jessica Román-Kustas, química analítica en los Laboratorios Nacionales Sandia. Román-Kustas es una de las autoras del novedoso estudio, publicado el pasado abril en *Advanced Materials Interfaces*. El método consiste en calentar y enfriar las alas bañadas en cloroformo y metanol, y en analizar las capas de sustancias conforme estas afloran. «Pasamos días enteros sentados ante el microondas, con un cronómetro y un ordenador», explica.

En ambas especies de cigarra, los investigadores descubrieron que la composición química de los nanopilares es importante para mantener la integridad estructural. «Cuando se eliminan las capas externas [de sustancias] de los nanopilares, estos se acortan y se arquean», asegura Marianne Alleyne, bióloga en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y una de las artífices del estudio.

En la cigarra anual *Neotibicen pruinosus*, este efecto wilting resultó aún más acusado y al inicio redujo la hidrofobicidad de las alas, si bien recuperaron parte de esa capacidad a medida que se eliminaron más sustancias. La actividad bactericida realmente aumentó al eliminar las primeras capas, pero volvió a disminuir de nuevo conforme se extrajeron más sustancias. El equipo halló que la cigarra *Magicicada cassinii*, cuyos adultos emergen cada 17 años y poseen nanopilares más cortos, tiene en la superficie alar compuestos que parecen tener propiedades bactericidas por sí solos, lo que apunta a que esta especie confía más en la composición que en la estructura para matar los microbios.

«Está claro que cada capa cumple un cometido distinto y la posibilidad de escrutar una capa en concreto es muy importante si se quiere desentrañar cómo condiciona la composición química las propiedades físicas generales», aclara Terry Gullion, fisicoquímico de la Universidad de Virginia Occidental, que no ha participado en el estudio.

Averiguar cómo influyen los compuestos químicos en la estructura ayudará a los ingenieros de materiales a fabricar productos mejores. «Con el conocimiento básico acerca de la interrelación entre la estructura física y la composición química podremos diseñar nuevos materiales con mayor racionalidad, seleccionando la conformación y la composición en función de lo que hemos observado en la naturaleza», concluye Alleyne.

—*Jillian Kramer*

CHARLES FLOYD/ALAMY (*cigarra*); CAMILO ENRIQUE MALDONADO MARÍN (*ave*)

AGENDA

CONFERENCIAS

3 de septiembre – Conferencia virtual
Hacia una economía libre de carbono
Vicente Cortés Galeano, Universidad de Sevilla
Universidad Internacional de Andalucía
www.unia.es

17 de septiembre
El párkinson: ¿Estamos avanzando en su tratamiento?
Ana Martínez Gil, CSIC
Librería científica del CSIC
Madrid
www.csic.es

EXPOSICIONES

Illustraciencia 7
Jardín Botánico de la Universidad de Valencia
Valencia
www.jardibotanic.org



Campus vivo: Investigar en la universidad
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es

OTROS

Desde el 16 de septiembre – Curso en línea
La divulgación científica: Un relato transmedia
Universidad de Murcia
www.um.es

Hasta el 25 de septiembre
FotoAves 2020
Certamen fotográfico
Convoca: SEO/BirdLife
www.seo.org

Hasta el 1 de octubre
Premio Matemático Ciudad de Oviedo
Concurso de ensayos científicos
Convoca: Ayuntamiento de Oviedo
www.rsme.es

CIUDADES

Una nueva ciencia de la movilidad urbana

Los datos telefónicos y de geolocalización están dibujando una nueva imagen de cómo usamos realmente nuestras ciudades. Los resultados aportan claves para construir urbes más sanas y sostenibles

ALEIX BASSOLAS, MATTIA MAZZOLI, JOSÉ JAVIER RAMASCO



SUBURBIO DE SHIBUYA, en la región metropolitana de Tokio. Un estudio ha demostrado que las ciudades con una estructura más jerárquica entre sus centros socioeconómicos presentan un mayor número de desplazamientos a pie y en transporte público.

GETTY IMAGES/SEAN PAVONE/ISTOCK

Desde nuestros inicios nómadas como cazadores-recolectores hasta nuestra contemporánea sociedad hiperconectada, la naturaleza humana ha estado siempre ligada al desplazamiento. Hoy, si bien los trayectos largos se dan de forma circunstancial por trabajo, turismo o migración, la mayor parte de la movilidad consiste en desplazamientos cortos y diarios entre el domicilio y el centro de trabajo o estudios. El continuo aumento de la población urbana ha situado en primer plano cuestiones como la congestión de las ciudades, el transporte sostenible o la contaminación. Todo ello nos obliga a entender cómo se organizan nuestras ciudades y la manera en que la gente se mueve en ellas.

La movilidad humana es muy diversa, pero hasta ahora solo hemos podido analizarla de forma parcial. Hasta hace poco, los datos se limitaban a los obtenidos a partir de censos y encuestas, métodos cuya elaboración conlleva grandes costes y organización, lo que impide actualizarlos con frecuencia. Sin embargo, gracias a la revolución digital de las últimas décadas y al auge de los teléfonos móviles dotados de sistemas de geolocalización, hoy resulta posible disponer de una cantidad de datos sin precedentes sobre cómo se desplazan las personas. Las fuentes son diversas: desde datos telefónicos hasta los procedentes de redes sociales como Twitter o Foursquare. Esto nos ofrece, por vez primera, una imagen de muy alta resolución de la movilidad humana. De hecho, y aunque la decisión haya resultado polémica, la movilidad del censo de España en 2021 se obtendrá, precisamente, a partir de datos telefónicos.

Desde el punto de vista científico, hemos visto cómo estas nuevas fuentes de datos nos ayudan a entender mejor las diversas escalas de los fenómenos de desplazamiento. Y también que, combinados con modelos computacionales, dichos datos nos permiten evaluar el impacto de las distintas políticas de movilidad. A modo de ejemplo, un trabajo reciente de nuestro grupo de investigación demostró cómo los datos procedentes de teléfonos móviles podían usarse para evaluar el efecto de un peaje situado en las afueras de Barcelona

sobre las demandas de desplazamiento de la población.

De manera más general, otros estudios de nuestro grupo han revelado que todas estas nuevas fuentes de datos pueden combinarse con métodos procedentes de la física y de le teoría de redes para entender la movilidad humana desde un punto de vista completamente nuevo, así como para vincular sus propiedades a la calidad de vida de los ciudadanos. Este enfoque reviste especial importancia en el momento actual. En la próxima década se espera una revolución debida a la descarbonización de la economía y el transporte, y los métodos que estamos desarrollando deberán desempeñar un papel central en la planificación y gestión de las futuras políticas de movilidad.

Física de la movilidad urbana

En una ciudad, entender cómo se organizan los desplazamientos recurrentes de la población resulta prioritario para numerosos fines, desde aliviar la congestión hasta mitigar la emisión de partículas contaminantes. Sin embargo, hablamos de un comportamiento humano que muy a menudo se nos antoja errático y caótico. ¿Es posible inferir leyes generales que predigan su comportamiento?

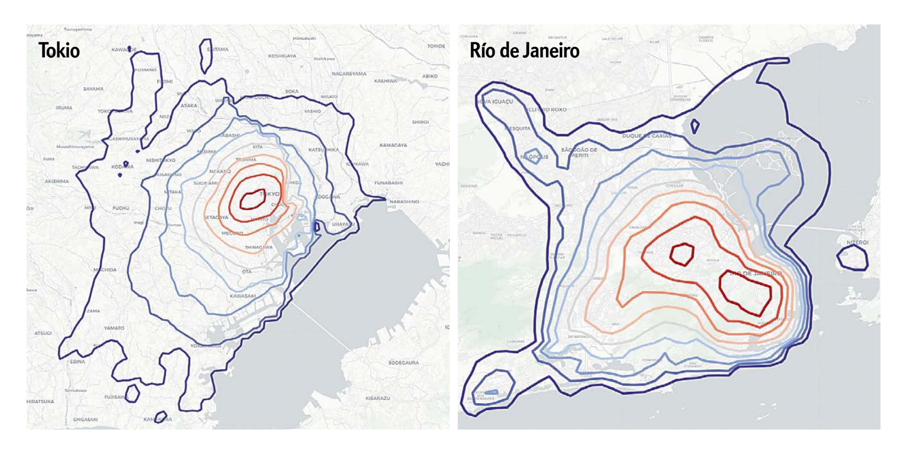
La respuesta es afirmativa. En un trabajo publicado el año pasado en *Nature Communications*, estudiamos los desplazamientos laborales de la población en varias ciudades del mundo a partir de un modelo tomado de la física: en concreto, una teoría de campos.

Para ello, gracias a datos geolocalizados de Twitter, extrajimos las zonas de residencia y trabajo de los ciudadanos. Sumando sus desplazamientos, definimos un vector de movilidad en cada región de la ciudad. En toda la urbe, tales vectores indican la dirección promedio de los trayectos en cada zona. Esto define un campo vectorial; es decir, un vector en cada punto del espacio.

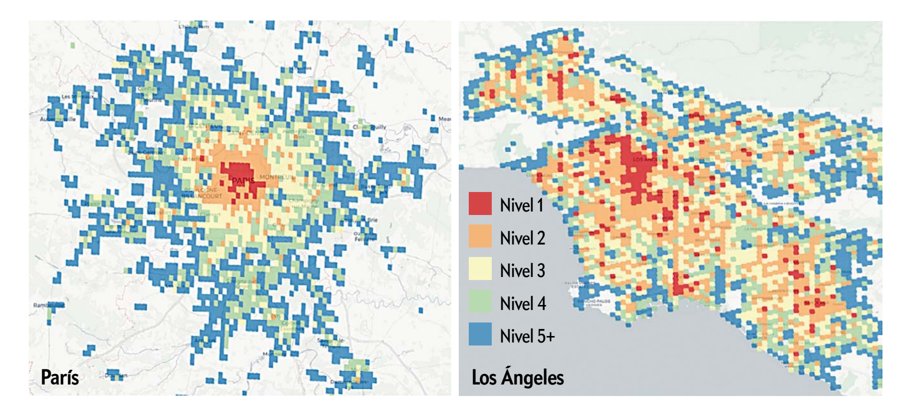
La orientación y magnitud de dichos vectores revela que la movilidad recurrente en una ciudad muestra un alto grado de organización. Pero lo interesante desde el punto de vista matemático es que dicho campo resulta ser «irrotacional» (los vectores no forman bucles), lo que implica que puede deducirse a partir de un potencial: una expresión matemática similar a los familiares potenciales del campo gravitatorio o eléctrico. Ello permite describir la movilidad urbana a partir de un paisaje virtual de valles y montañas, en el que los desplazamientos tienen lugar desde las zonas más elevadas hasta las más profundas.

Esta orografía virtual permite estudiar cuántos centros tiene realmente una ciudad a partir del número de pozos que observamos. Nuestros resultados revelaron que algunas ciudades, como París y Londres, son monocéntricas, con un solo pozo muy profundo. En cambio, Los Ángeles o Río de Janeiro muestran dos, lo que refleja una estructura policéntrica. En cuanto a los límites entre zonas, las curvas de potencial proporcionan una forma natural de definir las distintas regiones urbanas de interés.

Estos resultados arrojan luz sobre las propiedades que debería tener un modelo que intente reproducir los flujos de movilidad entre las distintas áreas de una ciudad. Esta no es una cuestión menor, pues las estimaciones de la demanda de transporte o la planificación de infraestructuras se llevan a cabo a partir de tales modelos. De todas las familias de modelos propuestos en los últimos decenios, solo los llamados «modelos de gravedad» (en los que el número de viajes aumenta con las poblaciones de origen y destino y disminuye con

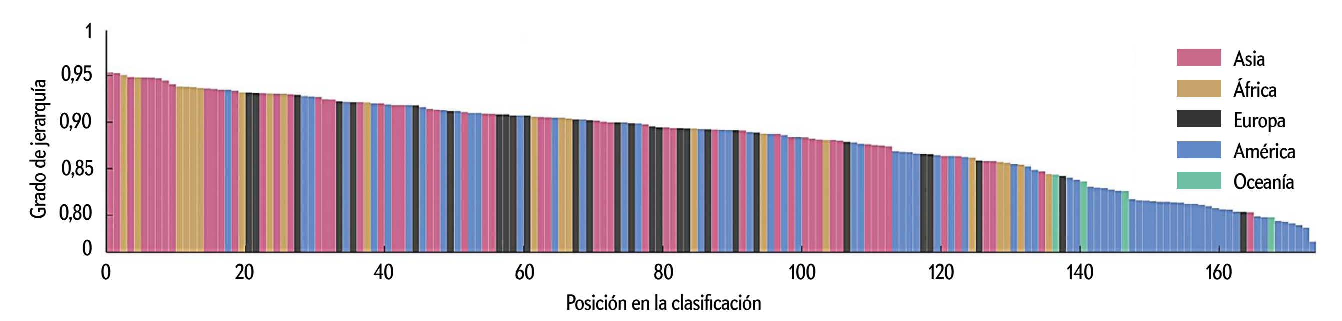


FÍSICA DE UNA CIUDAD: Los datos de geolocalización de Twitter han permitido derivar un modelo análogo a una teoría de campos en física para describir los trayectos laborales diarios que tienen lugar en una ciudad. De manera similar a una canica que rueda por un terreno ondulado, la población de una urbe se desplaza, en promedio, entre aquellas zonas a las que es posible asociar un potencial elevado («montañas», *azul*) y aquellas con un potencial bajo («valles», *rojo*). Este método permite determinar si una urbe es en realidad monocéntrica (*izquierda*) o policéntrica (*derecha*), así como discriminar entre los distintos modelos de movilidad que suelen emplearse para planificar el transporte o las infraestructuras.



MOVILIDAD Y ESTRUCTURA JERÁRQUICA: En una ciudad no todas las áreas atraen al mismo número de personas. Un análisis basado en los datos de movilidad de Google permite asociar un nivel de actividad a cada área en función del número de desplazamientos que se originan en ella. Las celdas que dan origen a un mayor número de viajes (*rojo*) se sitúan más arriba en dicha clasificación (*nivel 1*). Mientras que algunas ciudades presentan una clara estructura jerárquica (*izquierda*), otras muestran una considerable mezcla geográfica de las celdas asociadas a distintos niveles (*derecha*).

DE «FIELD THEORY FOR RECURRENT MOBILITY»; MATTIA MAZZOLI ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 10, ART. 3895, AGOSTO DE 2019 (*Tokio y Río de Janeiro*)
DE: «HIERARCHICAL ORGANIZATION OF URBAN MOBILITY AND ITS CONNECTION WITH CITY LIVABILITY»; ALEIX BASSOLAS ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 10, ART. 4817, OCTUBRE DE 2019 (*París y Los Ángeles*)



CIUDADES MÁS Y MENOS JERÁRQUICAS: Es posible definir un valor numérico entre 0 y 1 que refleje hasta qué punto los desplazamientos de una ciudad se ajustan a una estructura más jerarquizada (es decir, más centralizada y con mayor conectividad entre sus centros socioeconómicos) o menos. El análisis de 174 ciudades de todo el mundo revela importantes diferencias entre continentes (*gráfica*), así como una correlación entre el grado de jerarquía y diversos indicadores urbanos. Por ejemplo, las ciudades más jerarquizadas tienden a mostrar un mayor uso del transporte público, menos emisiones contaminantes y menores tiempos de llegada a los servicios de urgencias hospitalarias.

la distancia) son capaces de reproducir el campo vectorial y el potencial mencionados con anterioridad.

Jerarquía e indicadores urbanos

Otra de las características fundamentales de la movilidad urbana es la posible presencia de una jerarquía entre los centros de actividad. Una ciudad no se usa de forma uniforme, sino que siempre existen lugares que atraen a numerosas personas y otros que resultan mucho menos populares. En otro trabajo publicado también en 2019 en *Nature Communications*, hallamos que es posible cuantificar el grado de jerarquía existente en una ciudad y que dicho indicador se encuentra relacionado con la calidad de vida.

Gracias a cierto conjunto de datos de Google (el historial de localizaciones, cuyo uso para fines de investigación es aceptado por los usuarios) que integra la movilidad total de casi el 5 por ciento de la población del mundo (un hito sin precedentes en estudios anteriores), pudimos analizar la organización de los viajes en numerosas ciudades de todo el planeta. Una urbe puede dividirse en pequeñas celdas geográficas, y los datos en cuestión indican el número de viajes entre ellas. Para estudiar la jerarquía entre zonas, asignamos primero un nivel de actividad a cada celda en función del número de desplazamientos que se originan en ella. De esta forma, las celdas que dan origen a un mayor número de viajes se situarán más arriba en dicha clasificación.

Al representar los distintos niveles en un mapa, podemos ver cómo la distribución espacial de los distintos niveles difiere notablemente entre ciudades. Mientras que algunas, como París, muestran una distribución que recuerda a las capas de una cebolla, en otras, como Los Ángeles, las celdas asociadas a distintos niveles de actividad se encuentran mucho más mezcladas.

A partir de aquí puede definirse una métrica para cuantificar la jerarquización de una ciudad en función de los viajes entre celdas. Dicha métrica se acerca a 1 cuanto mayor es el número de desplazamientos entre celdas de nivel igual o consecutivo, y se aproxima a 0 cuando los trayectos se dan entre niveles muy diferentes. El análisis de 174 ciudades de todo el mundo reveló una gran heterogeneidad entre ellas. Curiosamente, la misma métrica es también un reflejo de la organización espacial de los niveles: aquellas ciudades que exhiben una mayor mezcla tienen también una movilidad menos jerárquica. Al analizar las tendencias por continentes, las ciudades asiáticas y africanas aparecen como las más jerárquicas, seguidas de las europeas, las americanas y las de Oceanía.

Por último, un análisis estadístico revela una correlación entre la organización jerárquica de una ciudad y sus sistemas de transporte, las emisiones contaminantes y la salud. Aquellas ciudades con una movilidad más jerárquica presentan un mayor número de desplazamientos a pie y en transporte público, lo que a su vez conlleva menos emisiones contaminantes. También hemos visto que los índices de mortalidad de ciertas enfermedades que requieren atención médica urgente son menores en las ciudades más jerarquizadas. Ello se debe a que, debido a la distribución espacial de los recursos en estas urbes, la distancia promedio al hospital más cercano es menor, lo que aumenta la probabilidad de supervivencia de los pacientes.

¿Qué lecciones de política pública podemos extraer de todo esto? Es instructivo notar que las ciudades más jerarquizadas tienden a mostrar mejores indicadores urbanos. Y dado que la jerarquía constituye una medida de la proximidad y conectividad entre centros socioeconómicos, se podría adaptar la oferta y demanda de viajes facilitando los desplazamientos de centro a centro, frente a una organización centro-periferia. Por último, la proximidad entre centros puede promoverse a través de políticas apropiadas de uso del suelo o leyes de zonificación en términos de áreas de negocio, residencia o servicios.

Aleix Bassolas *investiga en la Escuela de Ciencias Matemáticas de la Universidad Queen Mary de Londres.* ***Mattia Mazzoli*** *y* ***José Javier Ramasco*** *investigan en el Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (IFISC) de Palma de Mallorca, un centro mixto del CSIC y la Universidad de las Islas Baleares.*

PARA SABER MÁS

Systematic comparison of trip distribution laws and models. Maxime Lenormand, Aleix Bassolas y José J.Ramasco en *Journal of Transport Geography*, vol. 51, págs. 158-169, febrero de 2016.

Mobile phone records to feed activity-based travel demand models: MATSim for studying a cordon toll policy in Barcelona. Aleix Bassolas et al. en *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 121, págs. 56-74, marzo de 2019.

Field theory for recurrent mobility. Mattia Mazzoli et al. en *Nature Communications*, vol. 10, art. 3895, agosto de 2019.

Hierarchical organization of urban mobility and its connection with city livability. Aleix Bassolas et al. en *Nature Communications*, vol. 10, art. 4817, octubre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Grandes urbes: conseguir más con menos. Luís M. Bettencourt y Geoffrey B. West en *IyC*, noviembre de 2011.

La movilidad del futuro. Carlo Ratti y Assaf Biderman en *IyC*, octubre de 2017.

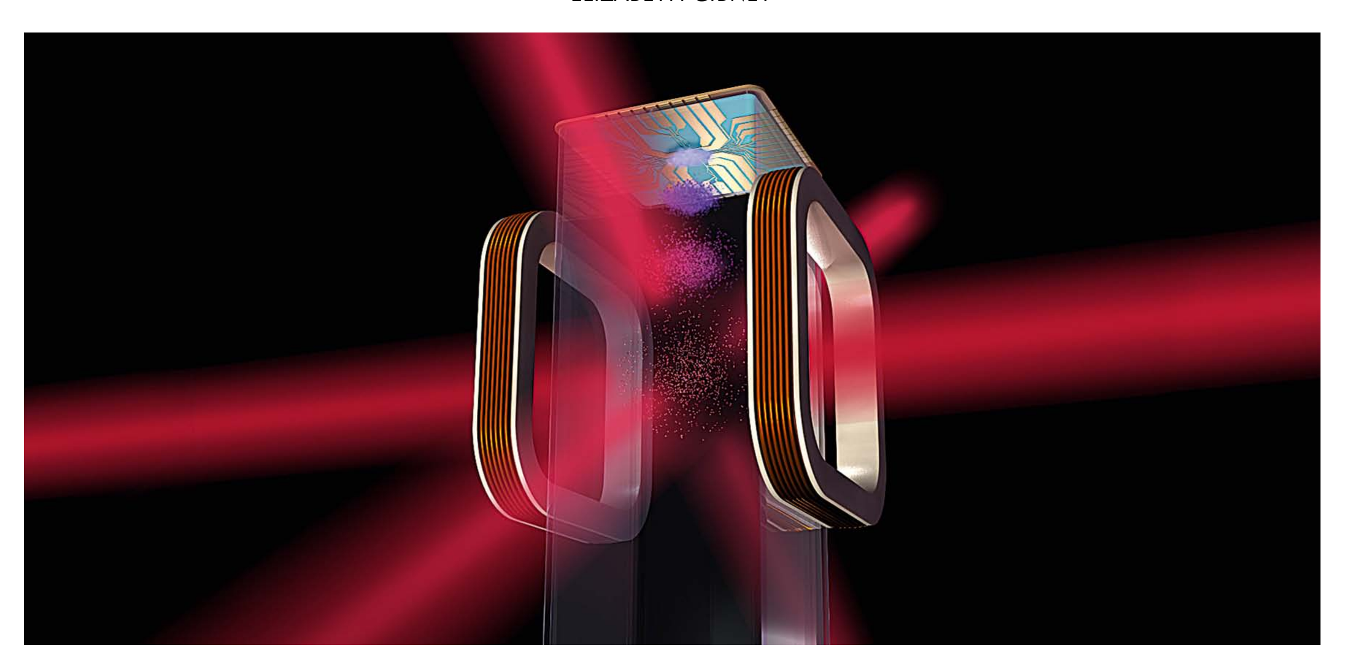
DE: «HIERARCHICAL ORGANIZATION OF URBAN MOBILITY AND ITS CONNECTION WITH CITY LIVABILITY», ALEIX BASSOLAS ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 10, ART. 4817, OCTUBRE DE 2019.

FÍSICA CUÁNTICA

Crean materia cuántica en un laboratorio en órbita

La obtención de un condensado de Bose-Einstein en la Estación Espacial Internacional permitirá explorar diversos misterios de la física fundamental

ELIZABETH GIBNEY



NASA/JPL-CALTECH

EL LABORATORIO DE ÁTOMOS FRÍOS de la NASA usa láseres y otras técnicas para enfriar átomos atrapados en campos magnéticos hasta temperaturas cercanas al cero absoluto, como muestra esta recreación.

Desde hace 25 años, los físicos utilizan un exótico estado de la materia que surge en átomos ultrafríos para investigar el comportamiento cuántico a escala macroscópica. Y ahora pueden hacerlo en el espacio.

La hazaña (la creación de un condensado de Bose-Einstein) la han protagonizado físicos del Laboratorio de Átomos Fríos de la NASA (CAL, por sus siglas en inglés), valorado en 100 millones de dólares, que entró en funcionamiento a bordo de la Estación Espacial Internacional en junio de 2018. Los resultados constituyen una prueba de concepto que muestra que el laboratorio puede explotar satisfactoriamente la microgravedad del espacio para generar fenómenos que serían imposibles en la Tierra.

«Me parece un logro sencillamente asombroso», comenta Courtney Lannert, física teórica del Colegio Smith, en Northampton, Massachusetts. Los hallazgos se publicaron el 11 de junio en la revista *Nature*.

Comportamiento exótico

Creados por primera vez en 1995, los condensados de Bose-Einstein se originan al enfriar nubes de átomos hasta rozar el cero absoluto [*véase* «Trampa de láser para partículas neutras», por Steven Chu; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1992]. A esta temperatura, prevalece la naturaleza cuántica ondulatoria de las partículas, que se funden en un único objeto cuántico macroscópico que los físicos pueden emplear para investigar comportamientos exóticos.

En la Tierra, la gravedad limita el estudio de estas nubes, puesto que se dispersan rápidamente a menos que los efectos gravitatorios se contrarresten con fuertes campos magnéticos. Sin embargo, en microgravedad, los condensados persisten durante más tiempo, lo que permite realizar investigaciones más precisas. Y dado que en el espacio pueden usarse trampas magnéticas débiles para atrapar los átomos, es posible reducir su temperatura aún más, en parte gracias a una técnica que enfría los condensados dejando que se expandan. «La mayoría de los físicos cuánticos dirían que los experimentos con átomos fríos son geniales, pero para mejorarlos hay que trasladarlos al espacio», asegura Kamal Oudrhiri, director de la misión del CAL en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California.

Los investigadores emplearon los precisos láseres del CAL en condiciones de alto vacío para producir condensados que sobrevivieron más de un segundo a 200 billonésimas de grado sobre el cero absoluto, al nivel de algunos de los experimentos más exitosos llevados a cabo en la Tierra. En futuras pruebas, el equipo planea bajar hasta una temperatura récord de 20 billonésimas de grado y crear condensados que perduren 5 segundos, afirma Oudrhiri. Eso lo convertiría en el lugar más frío del universo conocido.

Un laboratorio del tamaño de un lavavajillas

Este condensado no es el primero que se obtiene en el espacio. Algunos experi-

mentos realizados en cohetes que se adentran temporalmente en el espacio (y otros que utilizan torres de caída libre en la Tierra) han proporcionado indicios sobre la manera en que se comporta esta fase de la materia en condiciones de microgravedad. Pero el CAL es el primero de estos laboratorios que se halla en ese entorno de forma permanente, señala Maren Mossman, física de la Universidad Estatal de Washington en Pullman, y podría ser el primero de una serie de laboratorios de átomos fríos ubicados en el espacio. Su éxito no estaba garantizado, subraya: el CAL ha encajado instrumentos que suelen ocupar un laboratorio entero en un volumen del tamaño de un lavavajillas.

Y estos resultados no son más que el comienzo. Mossman forma parte de un equipo que emplea el CAL para crear estados de Efimov, grupos de partículas que no se unen de dos en dos, pero sí de tres en tres, y que llevan tiempo fascinando a los físicos.

Otros grupos también han iniciado experimentos para inducir fenómenos que solo son posibles en el entorno de la Estación Espacial Internacional. El equipo de Lannert, por ejemplo, ha empezado a producir burbujas de condensado de 30 micrómetros de diámetro. Sometidas a la gravedad de la Tierra, estas se acumularían y adoptarían forma de cuenco o de tortita. Las características de las burbujas, que son finas y no tienen bordes, deberían llevarlas a generar remolinos, o vórtices, con comportamientos novedosos, asegura la investigadora. «Esa forma no puede darse a no ser que se elimine la fuerza de la gravedad. Por el momento, las perspectivas son buenas, en el sentido de que la trampa hace lo que esperamos que haga.»

«Cirugía cardíaca» en el espacio

Aun siendo ya el experimento más complejo jamás realizado en la Estación Espacial Internacional, la instalación fue sometida a una asombrosa actualización en el mes de enero. En ocho días, las astronautas de la NASA Christina Koch y Jessica Meir instalaron un interferómetro atómico, un proceso que Oudrhiri compara con realizar una operación de corazón en el espacio.

El interferómetro divide las nubes en dos estados cuánticos (de modo que es como si cada átomo existiera en dos lugares a la vez), que luego vuelven a unirse para generar un patrón de interferencia. Este permite medir con gran sensibilidad las fuerzas alrededor del condensado, lo cual puede servir a los físicos para poner a prueba las leyes fundamentales de la naturaleza o para buscar la energía oscura. Los ensayos que se efectuaron en mayo (cuando el CAL, controlado remotamente, era el único laboratorio de átomos fríos activo en Estados Unidos, debido al confinamiento por el coronavirus) muestran que el interferómetro funciona según lo previsto, afirma Oudrhiri.

La naturaleza compacta del CAL obligó a hacer concesiones respecto a sus posibilidades: no es el laboratorio ideal para cualquier experimento, ya que debe ajustarse a las necesidades de múltiples proyectos, señala Lannert. «Pero el sacrificio merece la pena», añade. Además, permite a los físicos llevar a cabo estos experimentos sin necesidad de contar con grandes laboratorios. «Somos una pequeña universidad de humanidades, así que es tremendamente emocionante poder obtener datos con este instrumento.»

Elizabeth Gibney *es periodista especializada en física de* Nature.

Artículo original publicado en Nature.com el 11 de junio de 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Observation of Bose–Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab. David C. Aveline et al. en *Nature*, vol. 582, págs. 193-197, 11 de junio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El condensado de Bose-Einstein. Eric A. Cornell y Carl E. Wieman en *IyC*, mayo de 1988.
El gas más frío del universo. Graham P. Collins en *IyC*, febrero de 2001.
Mecánica cuántica de los condensados de Bose-Einstein. Arturo Polls, Jordi Boronat y Ferran Mazzanti en *IyC*, febrero de 2001.

GENÉTICA EVOLUTIVA

Vinculan un gen neandertal con la percepción del dolor

Las personas que han heredado de los antiguos homininos mutaciones que alteran los nervios suelen experimentar más dolor

EWEN CALLAWAY

La vida de los neandertales no era nada fácil. Subsistían a duras penas a lo largo de Eurasia occidental, cazando mamuts, bisontes y otros animales peligrosos. Ahora, un estudio pionero aparecido en *Current Biology* revela que, a pesar de su dura existencia, tenían una predisposición biológica para percibir el dolor con mayor intensidad. Los investigadores han descubierto que nuestros antiguos parientes portaban tres mutaciones en un gen que codifica la proteína $Na_V1.7$, que transmite las sensaciones dolorosas hasta la médula espinal y el cerebro. También han demostrado que, en una muestra de ciudadanos británicos, los que han heredado la versión neandertal de la $Na_V1.7$ suelen sentir más dolor que los demás.

«Es un primer ejemplo del modo en que empezamos a comprender la fisiología neandertal, tomando como referencia personas actuales», comenta Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, quien ha dirigido el estudio con Hugo Zeber, del Instituto Karolinska, cerca de Estocolmo.

Una proteína que controla el dolor

Los científicos han tenido acceso únicamente a unos pocos genomas de neandertal, y la mayoría de ellos han sido secuenciados con una baja resolución. Esto ha dificultado la identificación de mutaciones que se produjeron después de que su linaje se separase del de los humanos


RECONSTRUCCIÓN de una familia neandertal.

GETTY IMAGES/GORODENKOFF/ISTOCK

actuales, entre 500.000 y 700.000 años atrás. Pero, en los últimos años, Pääbo y su equipo han obtenido tres genomas de neandertal de gran calidad a partir de ADN encontrado en cuevas de Croacia y Rusia. Esto les ha permitido identificar mutaciones que seguramente eran muy comunes en los neandertales, pero que son muy raras en los humanos actuales.

Las mutaciones en el gen *SCN9A* (que codifica la proteína $Na_V1.7$) persistieron porque todos los neandertales tenían tres mutaciones que alteraban la forma de la proteína. El hallazgo de la forma mutada del gen en ambos conjuntos de cromosomas en los tres neandertales indica que era común en todas sus poblaciones.

La $Na_V1.7$ actúa en los nervios del cuerpo, controlando hasta qué punto las señales de dolor se transmiten a lo largo de la médula espinal hasta el cerebro. «La han descrito como una especie de "control del volumen", que determina la cantidad de dolor que transmiten las fibras nerviosas», explica Zeberg. Algunas personas con mutaciones genéticas extremadamente inusuales que desactivan la proteína no sienten dolor, mientras que otros cambios pueden predisponer a las personas a sufrir dolor crónico.

Para investigar cómo pueden las mutaciones haber alterado los nervios de los neandertales, Zeberg introdujo su versión de la $Na_V1.7$ en óvulos de rana y en células renales humanas (sistemas modelo útiles para caracterizar las proteínas que controlan los impulsos nerviosos). La proteína era más activa en las células que poseían las tres mutaciones que en las que no habían sufrido esos cambios. En las fibras nerviosas, esto podría reducir el umbral a partir del cual se transmitiría una señal dolorosa.

Zeberg y Pääbo buscaron luego humanos con la versión neandertal de la $Na_V1.7$. Alrededor de un 0,4 por ciento de los participantes del Biobanco de Gran Bretaña (una base de datos de los genomas de medio millón de británicos) que aseguraron tener una sintomatología dolorosa poseían una copia del gen mutado. Nadie portaba dos, como era el caso de los neandertales. Los participantes con la versión mutada del gen tenían un 7 por ciento más de probabilidades de sentir dolor en su vida diaria que las personas que no lo tenían.

Neandertales sensibles

«Es un trabajo hermoso», porque muestra cómo algunos aspectos de la fisiología neandertal pueden reconstruirse mediante el estudio de los humanos modernos, comenta Cedric Boeckx, neurocientífico de la Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados. En un estudio de 2019, Boeckx señaló otras tres proteínas que intervienen en la percepción del dolor que son diferentes en los humanos modernos y en los neandertales. Es posible que esos cambios sean una prueba de la existencia de diferencias en la resiliencia entre las dos especies, comenta Boeckx.

Pääbo y Zeberg advierten que sus hallazgos no significan necesariamente que los neandertales hubieran sentido más dolor que los humanos modernos. Las sensaciones transmitidas por la $Na_V1.7$ son procesadas y modificadas en la médula espinal y en el cerebro, lo que también contribuye a la experiencia subjetiva de dolor.

Gary Lewin, neurocientífico del centro Max Delbrück de Medicina Molecular de Berlín, señala que las variantes neandertales influyen muy poco en la función de la $Na_V1.7$, y mucho menos que otras mutaciones asociadas al dolor crónico. «Es difícil imaginarse por qué un neandertal querría ser más sensible al dolor», añade.

No está claro si las mutaciones evolucionaron porque fueran beneficiosas. Las poblaciones de neandertales estaban compuestas por pocos individuos y su diversidad genética era baja (condiciones que pueden ayudar a que las mutaciones perjudiciales persistan). Pero Pääbo cree que el cambio «huele» a producto de la selección natural. Por ello, planea secuenciar los genomas de unos cien neandertales, lo que podría ayudar a proporcionar algunas respuestas.

En cualquier caso, «el dolor es algo adaptativo», señala Zeberg. «No es particularmente malo sentir dolor.»

Ewen Callaway *es periodista especializado en biomedicina en* Nature.

Artículo original publicado en Nature.com el 23 de julio de 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

An *SCN9A* channelopathy causes congenital inability to experience pain. James J. Cox en *Nature*, vol. 444, págs. 894-898, diciembre de 2006.

The $Na_V1.7$ sodium channel: from molecule to man. Sulayman D. Dib-Hajj et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 14, págs. 49-62, 2013.

A catalog of single nucleotide changes distinguishing modern humans from archaic hominins. Martin Kuhlwilm y Cedric Boeckx en *Scientific Report*, vol. 9, artículo n.° 8463, junio de 2019.

A Neanderthal sodium channel increases pain sensitivity in present-day humans. Hugo Zeberg et al. en *Current Biology*, 23 de julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Genética de los neandertales. Carles Lalueza Fox y Antonio Rosas en *IyC*, mayo de 2009.

Nuestra herencia neandertal. Kate Wong en *IyC*, septiembre de 2010.

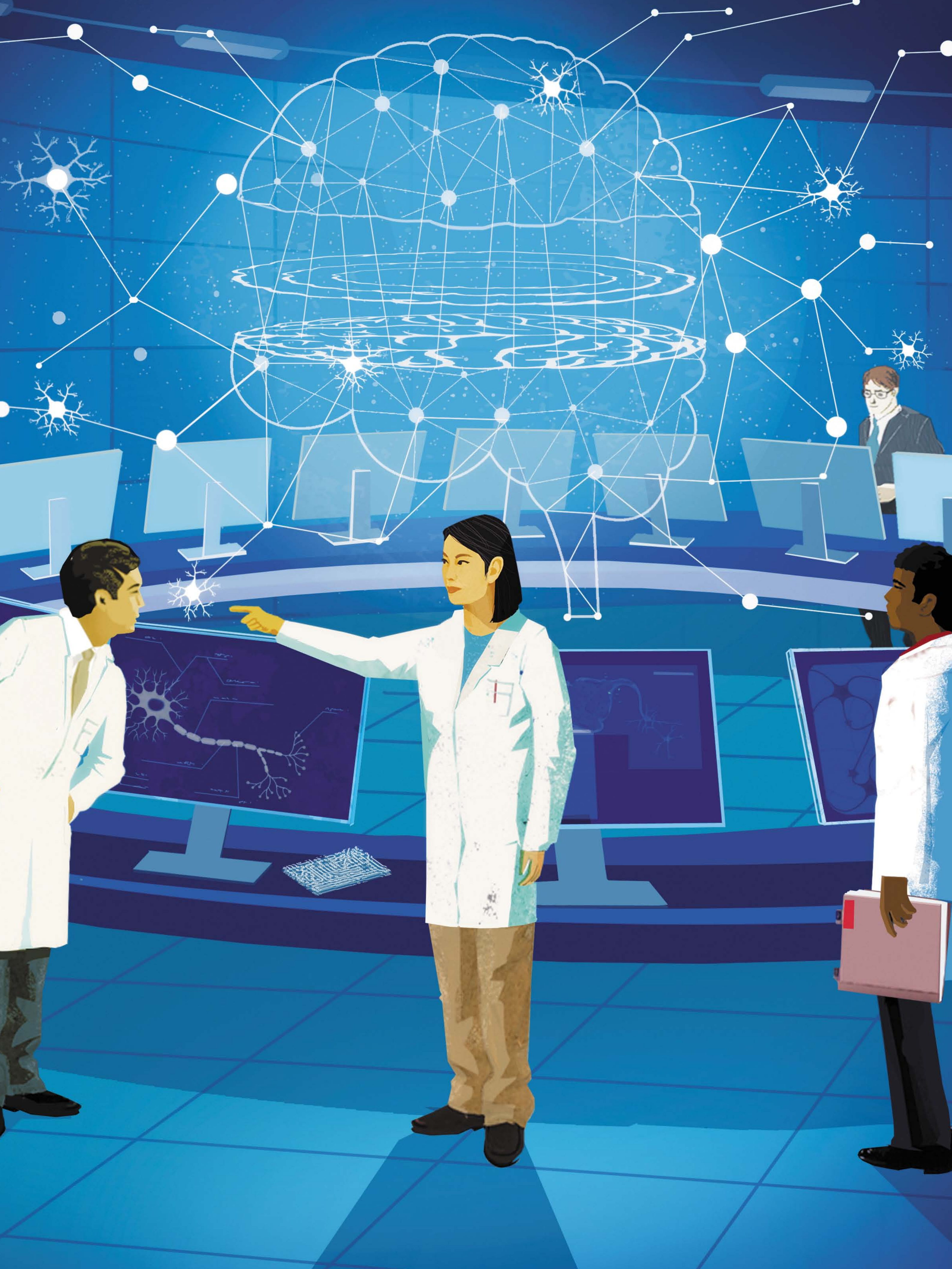
NEUROBIOLOGÍA

Las vías imprevistas del aprendizaje

La sustancia blanca, considerada hasta hace poco un tejido pasivo, desempeña un papel clave en el procesamiento de la información

R. Douglas Fields

EVA VÁZQUEZ



R. Douglas Fields es investigador principal de la Sección de Desarrollo y Plasticidad del Sistema Nervioso de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU.



Las nociones que tenemos sobre cómo aprende ese kilogramo flácido de sustancia gris embutido entre las orejas se remontan a los experimentos clásicos de Iván Pávlov con perros que aprendieron a salivar al oír una campana. En 1949, el psicólogo Donald Hebb adaptó la «regla del aprendizaje asociativo» de Pávlov para explicar cómo lograban las células cerebrales adquirir conocimientos. Hebb propuso que, cuando dos neuronas emiten impulsos simultáneos, se fortalecen las conexiones (sinapsis) entre ellas. Cuando esto ocurre, tiene lugar el aprendizaje. En el caso del perro, esto supondría que su cerebro sabía que el tintineo precedía al alimento. Esta idea dio lugar a un axioma muy citado: «Las sinapsis que se activan juntas están conectadas».

Esta teoría se ha consolidado y los datos moleculares sobre el cambio que se produce en las sinapsis durante el aprendizaje se han descrito con detalle. Pero no todo lo que recordamos es consecuencia de una recompensa o de un castigo y, de hecho, la mayoría de las experiencias las olvidamos. Aun cuando las sinapsis se activen a la vez, no siempre quedan conectadas. Nuestra memoria depende de la respuesta emocional a una experiencia, la novedad, el lugar o el momento y nuestro nivel de atención y motivación durante el episodio; luego, mientras dormimos, vamos procesando estos pensamientos y sentimientos. Al poner el foco en la sinapsis, nos hemos quedado con una «figura de trazos» demasiado simplista para explicar el aprendizaje y los recuerdos generados.

Está claro que el refuerzo de una sinapsis no genera por sí mismo un recuerdo, salvo en los reflejos más elementales de los circuitos sencillos. Para crear una memoria coherente se precisan cambios de gran calado en todo el cerebro. Tanto si se rememora la conversación de la cena de anoche con nuestros invitados como si aplicamos una pericia adquirida, por ejemplo montar en bici, precisamos la actividad coordinada de millones de neuronas de múltiples regiones diferentes del encéfalo para generar una memoria coherente en la que se entremezclan emociones, visiones, sonidos, olores, secuencias de acontecimientos y otras experiencias almacenadas. El aprendizaje abarca tal cantidad de elementos de nuestra experiencia que ha de incorporar necesariamente mecanismos celulares que trasciendan los cambios en las sinapsis. Este hallazgo ha impulsado la búsqueda de nuevas vías para entender cómo el cerebro transmite, procesa y almacena la información hasta conseguir «aprender». En los últimos diez años, los neurocientíficos se han dado cuenta de que la prestigiosa sustancia gris que recubre la superficie del encéfalo —bien conocida a través de ilustraciones en todo tipo de documentos, desde libros de texto hasta dibujos animados— no es la única porción de este órgano que participa en el registro permanente de hechos y acontecimientos para su posterior evocación e iteración. Se ha comprobado que las áreas situadas bajo esa superficie gris surcada por profundos pliegues también desempeñan una misión cardinal en el aprendizaje. En los últimos años, a través de una serie de estudios realizados en nuestro laboratorio y en otros hemos aclarado estos procesos que podrían revelar nuevas vías para el tratamiento de los trastornos mentales y del desarrollo que se producen cuando surgen problemas de aprendizaje.

Si los cambios sinápticos no bastan, ¿qué sucede entonces dentro del cerebro cuando aprendemos algo nuevo? Las modernas técnicas de resonancia magnética permiten examinarlo a través del cráneo. Al escrutar las imágenes así obtenidas, los investigadores comenzaron a advertir diferencias en la estructura cerebral de personas dotadas de un desarrollo extraordinario de ciertas capacidades. Por ejemplo, los músicos muestran un mayor espesor en la corteza auditiva que el resto de las personas. Al principio, se supuso que esas sutiles diferencias predispondrían a los clarinetistas y a los pianistas a destacar en la música. Sin embargo, la investigación posterior reveló que el aprendizaje modela la estructura del cerebro.

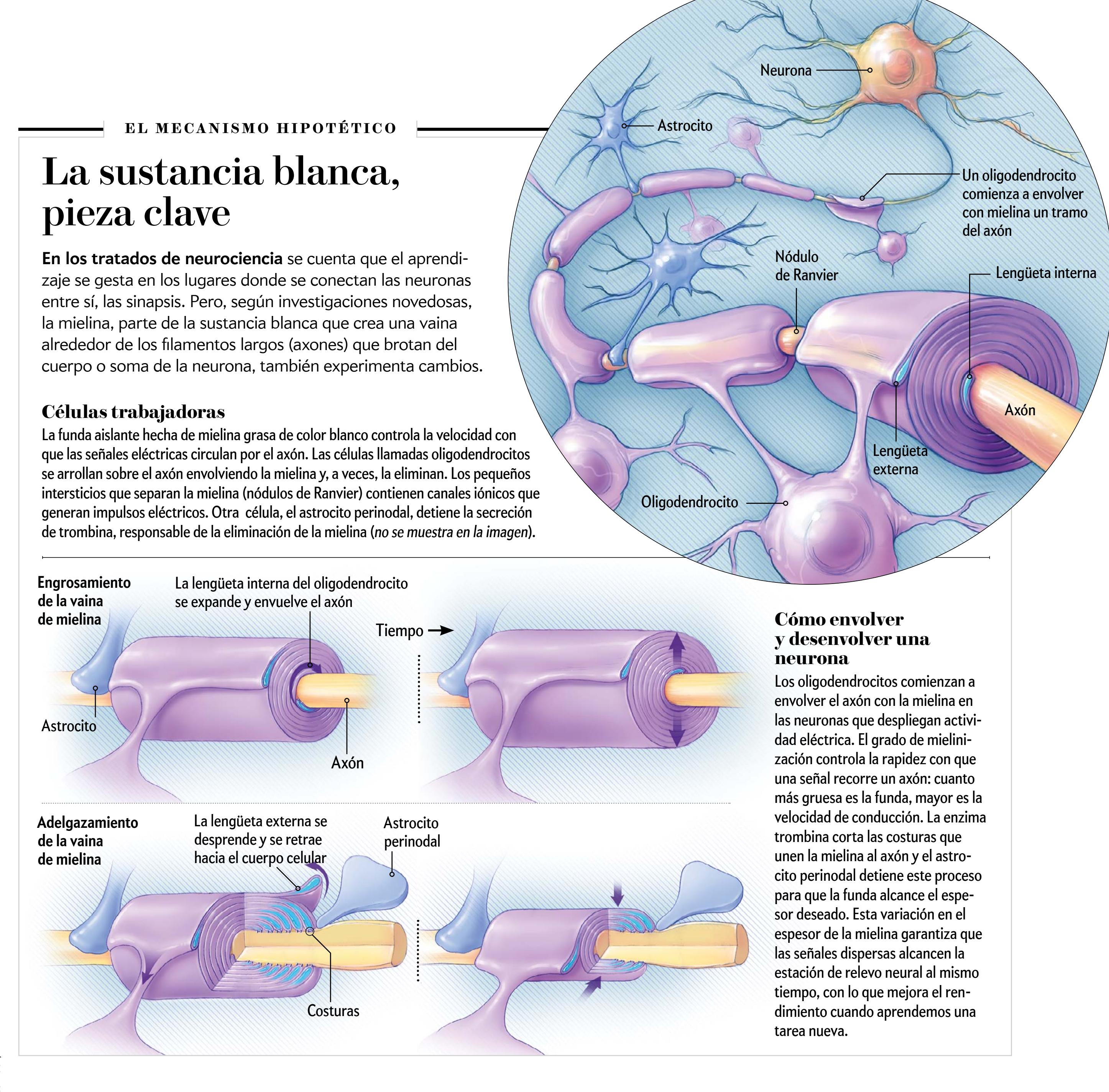
El tipo de aprendizaje que modifica el tejido cerebral no se limita a las funciones sensomotoras repetitivas, como tocar un instrumento musical. El neurocientífico Bogdan Draganski, en la actualidad en la Universidad de Lausana, y sus colegas fueron testigos del aumento del volumen de la sustancia gris en

EN SÍNTESIS

Se cree que el aprendizaje tiene lugar en los espacios de conexión entre las neuronas, llamados sinapsis. Sin embargo, estas tan solo almacenan recuerdos de los reflejos más elementales.

El aprendizaje y la memoria precisan un acoplamiento de información procedente de muchas regiones distintas del encéfalo. Esta actividad altera la estructura física de la mielina, el aislante que envuelve el cableado que conecta las neuronas.

La mielina desempeña, tal y como se ha descubierto, un papel esencial en el aprendizaje regulando la velocidad con que se transmite la información por las redes neurales.



FUENTE: «TREADMILLING MODEL FOR PLASTICITY OF THE MYELIN SHEATH», R. DOUGLAS FIELDS Y DIPANKAR J. DUTTA, EN *TRENDS IN NEUROSCIENCES*, VOL. 42, N.º 7; JULIO DE 2019; DAVID CHENEY (*ilustración*)

el cerebro de alumnos de medicina que habían estudiado para un examen. Se conocen muchos cambios celulares que podrían expandir el volumen de esa sustancia, por ejemplo, el nacimiento de nuevas neuronas y de otro tipo de células, que conforman la glía. Los cambios vasculares junto con los brotes y las podas de axones y dendritas, que se extienden desde el soma de la neurona, podrían actuar también de manera idéntica. Curiosamente, los cambios físicos del encéfalo durante el aprendizaje suceden a una velocidad bastante mayor de la prevista. Yaniv Assaf, de la Universidad de Tel Aviv, y sus colegas demostraron con un videojuego que bastaba con que los nuevos jugadores dieran 16 vueltas alrededor de la pista del circuito para que la región hipocámpica del cerebro cambiase. Los cambios estructurales del hipocampo de estos jugadores adquieren todo el sentido, porque esta región es imprescindible para el aprendizaje de la navegación por el espacio. En otros estudios, Assaf y, por separado, Heidi Johansen-Berg, de la Universidad de Oxford, se sorprendieron al detectar cambios en partes inesperadas del encéfalo, incluidas regiones carentes de neuronas o de sinapsis, conocidas en conjunto como sustancia blanca.

APRENDIZAJE PROFUNDO

La consciencia nace en la corteza cerebral, la capa externa del cerebro con un espesor de tres milímetros, así que precisamente aquí es donde la mayoría de los estudiosos esperaba hallar las modificaciones inducidas por el aprendizaje. Sin embargo, bajo esta capa superficial, miles de millones de fascículos de axones (fibras nerviosas), sólidamente entrelazados como las fibras entretejidas bajo el cuero de una pelota de béisbol, conectan las neuronas de la sustancia gris a través de los circuitos neurales.

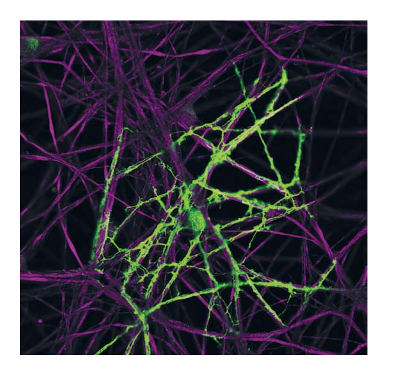
Estos fascículos fibrosos son blancos porque los axones están recubiertos de una sustancia grasa, llamada mielina, que actúa como aislante eléctrico y multiplica, de 50 a 100 veces, la velocidad de transmisión de las señales. Las lesiones y enfermedades que afectan a la sustancia blanca constituyen líneas importantes

de investigación, pero hasta hace poco apenas se había prestado atención al posible papel de la mielina en el procesamiento de la información y el aprendizaje.

En los diez últimos años se han empezado a advertir diferencias en la sustancia blanca a raíz del estudio del encéfalo de expertos en diversas capacidades, incluidas personas dotadas de aptitudes extraordinarias para la lectura y la aritmética. Los golfistas profesionales y los malabaristas experimentados también presentan diferencias en ella, comparados con los neófitos, e incluso se ha llegado a vincular su volumen con el coeficiente intelectual. Si el procesamiento de la información y el aprendizaje provienen del fortalecimiento de las conexiones sinápticas entre las neuronas de la sustancia gris, ¿por qué el aprendizaje afecta al «cableado» oculto bajo la superficie del cerebro?

En los estudios celulares de nuestro laboratorio empezamos a entrever una posible respuesta tras investigar cómo cambian las sinapsis —mas también otras áreas del encéfalo— durante el aprendizaje. El motivo para ir más allá de la sinapsis se debía a que la mayoría de los medicamentos con que se tratan los trastornos neurológicos y psíquicos actúan modificando la transmisión sináptica y es evidente que necesitamos preparados más eficaces con urgencia. El enfoque actual, centrado en la transmisión sináptica, podría echar por tierra la oportunidad de obtener mejores tratamientos contra la demencia, la depresión, la esquizofrenia o el trastorno por estrés postraumático.

A principios de la década de 1990, en nuestro laboratorio de la Red de Institutos Nacionales de Salud (NIH) y en otros se comenzó a barajar la posibilidad de que la glía detectase la información que circula a través de las redes neuronales y de que esa glía se pudiese modificar para mejorar el rendimiento. Las pruebas acumuladas desde entonces enseñan que todos los tipos de células gliales responden a la actividad neuronal y pueden modificar la transmisión de información en el encéfalo. Uno de los hallazgos más sorprendentes y novedosos guarda relación con la mielina.



UN OLIGODENDROCITO (*verde*) se prepara para recubrir de mielina un axón (*morado*).

R. DOUGLAS FIELDS, INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD DE EE.UU. Y NICHD

El aislamiento de mielina está formado por capas de la membrana celular que envuelven los axones como una cinta aislante. Ciertas células tentaculadas de la glía (los oligodendrocitos) envuelven los axones del encéfalo y la médula espinal. Otras, con forma de salchicha (las células de Schwann) desempeñan la misma tarea en las extremidades y el tronco. Muchos oligodendrocitos toman un axón y lo envuelven por segmentos con capas de mielina, como hacen los jugadores de béisbol cuando apilan sus manos para agarrar un bate y decidir qué equipo bateará primero. El minúsculo intersticio que separa dos segmentos contiguos de mielina deja expuesto un tramo desnudo del axón, donde se concentran canales iónicos que generan los impulsos eléctricos. Esos espacios de un micrómetro de ancho, conocidos como nódulos de Ranvier, actúan como repetidores bioeléctricos retransmitiendo el impulso eléctrico de un nódulo a otro a lo largo del axón. La velocidad de conducción de los impulsos aumenta con el número de capas de mielina que envuelven el axón y lo protegen frente a la pérdida de voltaje. Además, conforme los segmentos colindantes de mielina van oprimiendo más el nódulo de Ranvier, el impulso eléctrico se inicia más deprisa porque se tarda menos tiempo en cargar esa menguante membrana nodal hasta el voltaje preciso para que los canales iónicos se abran y generen el impulso.

Los trastornos que dañan la mielina, como la esclerosis múltiple y el síndrome de Guillain-Barré, causan una discapacidad grave porque, cuando el aislante queda dañado, cesa la transmisión de los impulsos neurales. No obstante, hasta hace poco, no todos aceptaban la idea de que los impulsos modificasen por sistema la mielina. Y aunque la estructura de esta cambiase, ¿cómo y por qué se iba a mejorar el rendimiento y el aprendizaje?

La explicación permanecía oculta a la vista de todos y se remontaba a la vieja máxima sobre la descarga y la conexión conjuntas de las neuronas. En cualquier red compleja de información o transporte, el instante de la llegada a las estaciones de relevo de la red es crítico; piense, por ejemplo, cuando se pierde la conexión con otro vuelo porque su avión aterriza demasiado tarde.

¿Cómo se sincroniza, pues, la velocidad de conducción en cada relevo del cerebro para que el impulso llegue en el momento oportuno? Sabemos que las señales eléctricas se desplazan por algunos axones a paso lento y por otros como un bólido. Las señales de dos axones que convergen en neuronas de una estación de relevo no llegarán a la vez salvo que se controle primorosamente la duración de su recorrido desde el origen, para compensar así la diferente longitud de ambos axones y la velocidad con que viajan los impulsos a lo largo de cada estación.

La mielina es el medio de aceleración más eficaz de los impulsos y, por eso, la mielinización de los axones facilita la transmisión óptima de la información a través de una red. Si los oligodendrocitos detectan y responden al tráfico de la información que fluye a través de los circuitos neurales, entonces la formación de la mielina y el ajuste de la velocidad de transmisión de los impulsos se podría controlar mediante retroalimentación axónica. Pero ¿cómo detecta la glía mielinizante los impulsos neurales que circulan a través de los axones?

TRANSMISIÓN DE LA SEÑAL

Durante los últimos veinte años, nuestro trabajo y el de otros laboratorios ha permitido descubrir numerosos neurotransmisores y otras moléculas de señalización que indican a la glía la presencia de actividad eléctrica en el axón con el objetivo de estimular su mielinización. De acuerdo con nuestros experimentos, cuando una neurona se activa, los neurotransmisores no solo se liberan en las sinapsis, sino también a lo largo del axón. Comprobamos, por ejemplo, que los «tentáculos» de los oligodendrocitos sondean los tramos desnudos (sin mielina) de los axones en busca de los neurotransmisores liberados tras la propagación del impulso a lo largo de ellos. Cuando un tentáculo toca un axón activo, crea mediante «soldadura por puntos» un contacto para establecer una comunicación entre el axón y el oligodendrocito. Este comienza a sintetizar mielina en ese lugar y va envolviendo el axón.

Cuando dimos a unos oligodendrocitos cultivados la opción de mielinizar axones con actividad eléctrica o bien axones tratados con toxina botulínica —que impide la liberación de neurotransmisores—, ocho prefirieron los axones con actividad eléctrica, y uno, los silentes. Así, a medida que una persona

aprende a tocar *Para Elisa* en el piano, los axones desnudos van quedando envueltos en mielina o aumenta el volumen de las vainas de los circuitos activados de forma reiterada durante el ejercicio, con lo cual se acelera el flujo de información a través de las redes encefálicas. La nueva mielina se reconoce en la resonancia magnética por los cambios en los tractos de sustancia blanca de las zonas del encéfalo requeridas para la ejecución musical.

Varios laboratorios han comprobado en fecha reciente que los potenciales de acción (las señales que recorren los axones en toda su longitud) estimulan la mielinización de las áreas expuestas del cableado neural. En 2014, en el laboratorio de Michelle Monje de la Universidad Stanford se señaló que la estimulación optogenética (láseres que activan las neuronas) aumenta la mielinización en el cerebro del ratón. En ese mismo año, en el laboratorio de William Richardson del Colegio Universitario de Londres se reparó en que, si se impedía la formación de mielina nueva, los ratones tardaban más en aprender a correr en una rueda desprovista de algunas barritas. En estudios de microscopía confocal para observar cómo se forma la mielina en peces cebra vivos, los investigadores del laboratorio de David Lyons, en la Universidad de Edimburgo, y del laboratorio de Bruce Appel de la Universidad de Colorado en Denver se dieron cuenta de que, si se impide la liberación de los saquitos axónicos llenos de neurotransmisores, se desprenden a menudo las primeras capas de mielina y el oligodendrocito aborta el proceso.

Hace poco, en una investigación con nuestros colegas Daisuke Kato y otros de diversas instituciones japonesas mostramos de qué forma la mielina fomenta el aprendizaje asegurándose de que las diversas «espigas» (señales eléctricas) que recorren los axones lleguen al mismo tiempo a la corteza motora, la región del cerebro que controla el movimiento. En esta ocasión, observamos cómo ratones —con una mielinización deficiente por una modificación genética— que habían aprendido a tirar de una palanca para obtener una recompensa, aumentaban la mielinización de la corteza motora durante el aprendizaje. Con el fin de registrar los impulsos neurales usamos electrodos y descubrimos que los potenciales de acción de la corteza motora de roedores con una mielinización deficiente se sincronizaban menos. A continuación, reforzamos la sincronización de las «espigas» en dicha corteza aplicando la optogenética para que las neuronas se activasen en el momento oportuno. Los ratones con una mielinización deficiente ejecutaron con eficiencia la tarea aprendida. Con el tiempo, ciertas modalidades menos invasivas de estimulación cerebral podrían constituir una terapia eficaz de los trastornos neurológicos y psíquicos causados por una mielinización anómala.

A pesar de estos avances recientes, no siempre basta con estimular la mielinización axónica para aprender algo nuevo, porque no podemos sincronizar la llegada de las espigas de los potenciales de acción hasta las estaciones de relevo críticas de las redes neuronales simplemente acelerando los impulsos. Debe, por tanto, existir una vía que enlentezca los impulsos que entran demasiado pronto en esos centros. Si se quiere acelerar o aminorar la transmisión de las señales, hay que engrosar o adelgazar de modo controlado la mielina ya enrollada en los axones. Antes de nuestros descubrimientos, nadie sabía adelgazar la vaina de mielina para retrasar las señales —aparte del daño causado por ciertas enfermedades—. En nuestra última investigación detectamos otro tipo de célula glial implicada en estos cambios «plásticos» del sistema nervioso.

El nódulo de Ranvier está rodeado por una célula de la glía llamada astrocito. Este desempeña numerosas funciones, pero ha sido ignorado por la mayoría, en gran parte porque no se comunica con otras células mediante impulsos eléctricos. Sorprendentemente, las investigaciones del último decenio han puesto de manifiesto que los astrocitos situados cerca de la sinapsis entre dos neuronas regulan la transmisión sináptica durante el aprendizaje liberando o captando neurotransmisores locales. No obstante, hasta hace poco, los biólogos especialistas en la mielina solían ignorar este singular tipo de astrocito que entabla contacto con el axón en un nódulo de Ranvier.

¿Qué hacen exactamente los astrocitos llamados perinodales para adelgazar la capa de mielina? Al igual que cuando se rehace una prenda de vestir, estas células ayudan a cortar las «costuras». La vaina de mielina se une al axón mediante una junta espiral que flanquea el nódulo de Ranvier. Con el microscopio electrónico, estas uniones se visualizan como «puntadas espirales» entre el axón y la mielina, y los hilos que crean cada punto están compuestos por un complejo de tres moléculas de adhesión celular. Según nuestro análisis de la composición molecular de estas costuras, una de estas moléculas, la neurofascina 155, tiene un sitio que se puede cortar con una enzima concreta, la trombina, y así adelgaza la mielina.

La trombina es producida por las neuronas, pero también entra en el encéfalo a través del aparato circulatorio. A medida que la mielina se va despegando del axón, deja al descubierto un tramo desnudo más largo en el nódulo de Ranvier. La capa externa de mielina está unida al axón adyacente a los astrocitos perinodales. Cuando la mielina se desprende del axón, esa capa externa se retrae dentro de un oligodendrocito y la vaina se adelgaza. El ensanchamiento del intersticio nodal y el adelgazamiento de la vaina de mielina disminuyen la velocidad de los impulsos.

En el laboratorio descubrimos que el corte enzimático de los hilos que cosen la mielina al axón es gobernado por el astrocito perinodal mediante la liberación de un inhibidor de la trombina. Luego, realizamos experimentos en ratones genéticamente modificados para que los astrocitos liberasen una cantidad menor de ese inhibidor de la trombina. Al examinar las neuronas al microscopio electrónico observamos que la mielina se había adelgazado, y el intersticio nodal, ensanchado. Gracias al uso de amplificadores electrónicos que detectan los impulsos neurales y permiten medir su velocidad de transmisión, nos percatamos de que, después de que disminuyera el espesor de la mielina, la velocidad de los impulsos a través del nervio óptico se había enlentecido en un 20 por ciento y la visión de los animales había disminuido. Inyectando inhibidores de la trombina —autorizados para el tratamiento de trastornos vasculares— logramos revertir tales cambios.

Nuestros experimentos respaldan una nueva hipótesis: los cambios en el espesor de la vaina de mielina representan una nueva forma de plasticidad del sistema nervioso sujeta a la adición y a la sustracción de esta sustancia. Las capas de mielina no se agregan a los axones como cuando se envuelve un cable con una cinta aislante, porque los «tentáculos» de los oligodendrocitos acabarían atados por nudos. El nuevo aislante se crea más bien mediante el arrollamiento en espiral sobre el axón de una nueva capa interna que se extiende bajo la mielina suprayacente. El astrocito perinodal puede despegar la capa externa de mielina haciendo que la vaina se adelgace. El espesor de la vaina no es fijo, sino que refleja el equilibrio dinámico entre la adición de capas sobre el axón y la eliminación de la capa externa sujeta al control del astrocito.

ONDAS CEREBRALES

Para fortalecer la sinapsis es imprescindible que los potenciales de acción lleguen en el momento preciso a las estaciones de relevo, y esta llegada se puede regular para la descarga conjunta. La plasticidad de la mielina podría, no obstante, contribuir a la función de los circuitos neurales y al aprendizaje por otra vía: la modulación de la frecuencia oscilatoria de las ondas cerebrales. No toda la actividad neuronal del encéfalo proviene de las aferencias (entradas) sensoriales. Gran parte se origina en el propio cerebro, de modo tanto consciente como inconsciente. Esta actividad autogenerada se caracteriza por ondas oscilantes de distinta frecuencia que barren el encéfalo igual que la vibración del motor de un automóvil a cierta velocidad hace que algunas piezas del vehículo repiqueteen con una frecuencia resonante.

Se cree que estas ondas u oscilaciones constituyen un mecanismo clave para el acoplamiento de las neuronas a través de regiones remotas del encéfalo, hecho que podría revestir importancia para clasificar y transmitir la información neural. Estas oscilaciones, por ejemplo, consolidan la actividad neuronal de la corteza prefrontal, que otorga el sentido contextual, y del hipocampo, que codifica la información espacial. El acoplamiento oscilatorio nos permite reconocer enseguida una cara familiar en el trabajo, pero de igual manera dificulta la identificación de ese mismo colega si lo encontramos en un lugar desacostumbrado.

Aún más importante, las diversas etapas del sueño, críticas para el almacenamiento de los recuerdos a largo plazo, se reconocen por la oscilación de las ondas cerebrales con una frecuencia diferente. Las experiencias acumuladas durante el día se reproducen durante el sueño y se ordenan para almacenarlas o eliminarlas según la relación que guarden con otros recuerdos y emociones, es decir, se marcan como potencialmente útiles (o no) para el futuro. Se cree que las oscilaciones apropiadas de las ondas cerebrales son fundamentales para consolidar la memoria. No obstante, la velocidad de transmisión de los impulsos es crítica para su sincronización.

Así como dos niños deben sincronizar con precisión el estiramiento y la flexión de las piernas para jugar en un balancín, las demoras de la transmisión entre dos grupos de neuronas oscilantes deben programarse para que las neuronas acopladas oscilen de forma sincrónica a lo largo y ancho del cerebro. La plasticidad de la mielina es importante para las ondas porque la velocidad de conducción debe ser la adecuada para mantener las oscilaciones que acoplan dos regiones con la misma frecuencia.

Esta conclusión se basa en la modelización matemática de la física elemental de propagación de las ondas formulada por el autor junto con sus colegas del NIH, Sinisa Pajevic y Peter Basser. En 2020, en un estudio de Patrick Steadman y sus colaboradores del laboratorio de Paul Frankland en la Universidad de Toronto, esta idea obtuvo un respaldo empírico convincente. Los investigadores examinaron a ratones genéticamente modificados para detener la mielinización de forma transitoria y comprobaron que la capacidad de los roedores para sentir miedo en un ambiente inseguro o recordar los lugares seguros dependía de la formación de mielina nueva. Más aún, la actividad de las ondas cerebrales del hipocampo y la corteza prefrontal se acoplaba durante el sueño facilitando el aprendizaje. Cuando se impidió la formación de nueva mielina, se debilitaron también las conexiones y se generó un problema de memoria parecido al que se advierte a menudo en el contexto apropiado entre personas que han sufrido un suceso traumático y luego tienen dificultades para asociar el miedo.

El aprendizaje y la ejecución de cualquier tarea compleja requiere un funcionamiento coordinado de muchas neuronas diferentes en diversas regiones del encéfalo y obliga a las señales a recorrer grandes redes neuronales a una velocidad óptima. La vaina de mielina es crucial para una conducción óptima, pero las personas, cuando envejecen, empiezan a perderla en la corteza cerebral. Esta degradación gradual es una de las razones del enlentecimiento cognitivo y de la dificultad creciente para el aprendizaje durante la tercera edad.

Imagínese cómo una demora en la transmisión interrumpe la comunicación telefónica a larga distancia. De igual modo, los retrasos en el encéfalo pueden ocasionar dificultades cognitivas y una desorganización del pensamiento en personas con trastornos psiquiátricos como la esquizofrenia. De hecho, en muchos trastornos neurológicos y psiquiátricos se aprecian diferencias en las oscilaciones de las ondas cerebrales. En la enfermedad de Alzheimer, por ejemplo, se observan cambios en la sustancia blanca.

Los medicamentos que controlan la producción de mielina podrían abrir nuevas modalidades de tratamiento para estos problemas. La mielinización está influida por muchas formas de actividad neuronal, de modo que técnicas tan diversas como, por ejemplo, el entrenamiento cognitivo, la neurorretroalimentación y la fisioterapia, podrían resultar útiles para combatir el declive cognitivo asociado al envejecimiento y otros trastornos. En un estudio reciente de personas mayores realizado por Jung-Hae Youn y sus colaboradores en Corea del Sur se señaló que la práctica de ejercicios de memoria durante 10 semanas mejoraba la capacidad de recuerdo. Las imágenes cerebrales obtenidas antes y después de los ejercicios revelaron un aumento de la integridad de los tractos de sustancia blanca que se conectan con el lóbulo frontal en el grupo de personas mayores que siguieron las sesiones de refuerzo de la memoria.

Estos conceptos novedosos han comenzado a cambiar nuestra forma de pensar sobre el funcionamiento del encéfalo como sistema. Hoy se cree que la mielina, considerada durante mucho tiempo un aislante inerte de los axones, contribuye al aprendizaje controlando la velocidad a la que las señales recorren el cableado neural. Al adentrarnos más allá de la sinapsis, estamos comenzando a completar el «dibujo de trazos» de la plasticidad sináptica para crear una imagen más completa de lo que sucede en nuestro encéfalo cuando aprendemos.

PARA SABER MÁS

New mechanism of nervous system plasticity: activity-dependent myelination. R. Douglas Fields en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 16, págs. 756–767, diciembre de 2015.

Regulation of myelin structure and conduction velocity by perinodal astrocytes. Dipankar J. Dutta et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 115, n.º 46, págs. 11 832–11 837, noviembre de 2018.

Disruption of oligodendrogenesis impairs memory consolidation in adult mice. Patrick E. Steadman et al. en *Neuron*, vol. 105, n.º 1, págs. 150–164.e6, 8 de enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La mielina. Leonardo Mateu en *IyC*, agosto de 1987.

Inteligencia y mielina. Aljoscha Neubauer en *MyC*, n.º 2, 2003.

Nódulos de Ranvier. J.-Antoine Girault en *MyC*, n.º 11, 2005.

Oligodendrocitos y esclerosis múltiple. Alberto Pérez Martín y Carlos Matute en *MyC*, n.º 16, 2006.

¿Qué función cumple la sustancia blanca? R. Douglas Fields en *IyC*, mayo de 2008.

El aprendizaje transforma el cerebro. Jan Scholz y Miriam Klein en *MyC*, n.º 51, 2011.

NEUROCIENCIA & PSICOLOGÍA

El funcionamiento de nuestra mente y de nuestro cerebro, por fin explicado de forma clara y amena en una biblioteca imprescindible para conocernos mejor.

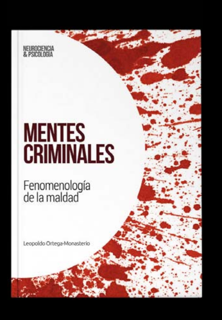
Una colección creada por un equipo multidisciplinar con la voluntad de aunar el rigor científico y el espíritu divulgativo.

Dirigida por el profesor Tomás Ortiz Alonso, catedrático del Departamento de Psiquiatría de la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid.

Descubre las **VENTAJAS** y **REGALOS** de la **SUSCRIPCIÓN** en **www.salvat.com**

ALGUNOS TÍTULOS DE LA COLECCIÓN

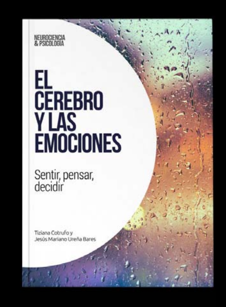














¡YA EN TU QUIOSCO!

UNA OBRA RIGUROSA AL ALCANCE DE TODOS

www.salvat.com/colecciones/neurociencia-y-psicologia





ARQUEOLOGÍA

La conquista agrícola de Europa

El encuentro de los pueblos agrarios con los cazadores-recolectores habría dado lugar a una jerarquía que hoy resulta inquietante

Laura Spinney

Ilustración de Benoit Clarys



LAS TUMBAS PREHISTÓRICAS halladas en Europa a veces contienen un «señor», depositado con delicadeza en posición fetal, y uno o más «esclavos», posiblemente sacrificados y arrojados a la sepultura.

Laura Spinney es escritora y periodista científica. Su último libro de ensayo es *El jinete pálido: 1918: La epidemia que cambió el mundo,* de 2017 (editado en España por Crítica).



Hace ocho mil años, los únicos humanos que erraban por los exuberantes bosques europeos eran pequeñas bandas seminómadas de cazadores-recolectores. Las excavaciones arqueológicas, tanto de cuevas como de otros emplazamientos, revelan vestigios de su tecnología mesolítica: artefactos de pedernal tallados con los que pescaban, cazaban ciervos y uros (una especie de bóvido ya extinta) y recolectaban plantas silvestres. Muchos tenían el pelo oscuro y los ojos claros, según apuntan los últimos estudios genéticos, y los pocos esqueletos que se han desenterrado indican que eran altos y musculosos. Las lenguas que hablaban siguen siendo un misterio.

Tres milenios después, los bosques que habitaban habían sido desplazados por campos de trigo y lentejas, y los agricultores dominaban el continente. La transición les resultó evidente incluso a los arqueólogos del siglo XIX, cuyas excavaciones revelaron huesos de animales domesticados, recipientes de alfarería con restos de cereales y, lo más llamativo de todo, inhumaciones con enigmas que todavía hoy siguen sin descifrar. La agricultura no solo trajo consigo un nuevo modelo económico, sino también utillaje de metal, nuevas pautas de alimentación e innovaciones en la explotación de la tierra, además de cambios en las relaciones entre humanos y de estos con la naturaleza.

Los eruditos se pasaron 150 años debatiendo si los agricultores importaron a Europa su cultura neolítica desde el Oriente Medio o si solo fueron sus ideas las que viajaron. La cuestión se mantuvo así hasta que, a principios de la década del 2000, algunos genetistas como Martin Richards, en aquel momento en la Universidad de Oxford, estudiaron las variaciones en los genes modernos para demostrar de forma irrefutable que los agricultores sí migraron. Cruzaron el mar Egeo para pasar a Grecia, y el Bósforo para adentrarse en la península balcánica, desde donde se extendieron hacia el norte y el oeste. Luego, científicos como Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, aprendieron a extraer y leer el ADN de restos humanos antiguos. Estas técnicas revolucionarias posibilitaron una colaboración sin precedentes entre arqueólogos y genetistas, que se apresuraron a caracterizar el ADN de individuos fallecidos en asentamientos prehistóricos de cazadores-recolectores o agricultores-ganaderos.

En 2014, el equipo de la arqueóloga Cristina Gamba, por entonces en el Trinity College de Dublín, descubrió en Hungría el hueso de un cazador-recolector entre los de una comunidad agraria primitiva; desde ese momento, ha ido perfilándose una imagen sorprendentemente compleja y polifacética de los encuentros que se produjeron entre los residentes y los inmigrantes. En algunos lugares, los dos grupos se mezclaron de entrada, mientras que en otros se mantuvieron apartados durante siglos e incluso milenios. A veces, los agricultores-ganaderos veneraban a sus predecesores, pero otras veces los deshumanizaron y subyugaron. Fuese como fuese, hay una tendencia clara: con el paso de las décadas, a medida que los agricultores aumentaban en número, fueron asimilando y sustituyendo a los cazadores-recolectores, marginando, tanto en sentido geográfico como social, a quienes se resistían a abandonar su forma de vida ancestral. Lo más inquietante es que aquella creciente desigualdad habría culminado, al menos en algunos lugares, en sociedades que esclavizaban a las personas de ascendencia cazadora-recolectora, llegando incluso a sacrificarlas para que acompañasen a sus señores en el otro mundo.

EL ÉXODO

Hace alrededor de 11.500 años, Europa y Oriente Medio estaban saliendo de una glaciación. Con un clima más suave y una tierra más fecunda, poco a poco se fueron sedentarizando los cazadores-recolectores que habitaban el Creciente Fértil, una amplia región en forma de media luna situada en torno a los ríos Éufrates, Tigris y Nilo y la costa mediterránea oriental.

EN SÍNTESIS

Hace unos 9000 años, llegaron a Europa poblaciones agropecuarias procedentes del Oriente Medio, en busca de nuevas tierras de cultivo.

Los migrantes siguieron dos rutas, una a lo largo del Danubio y la otra por la costa mediterránea, y en ambas se toparon con los cazadores-recolectores que habitaban los bosques.

Primero, los campesinos comerciaron o se aparearon con los cazadores-recolectores. Pero hace 5000 años, la agricultura ya dominaba el continente y habían surgido sociedades jerárquicas.

Los estudios genéticos permiten suponer que los descendientes de cazadores-recolectores eran tratados como inferiores.

Dedicaban cada vez menos tiempo a cazar íbices y jabalíes o recoger gramíneas silvestres, y más a cuidar de los animales y las plantas que habían domesticado: ovejas, cabras, trigo, guisantes y lentejas. La arqueobotánica, sobre todo el estudio de los pólenes arcaicos, y la arqueozoología (el estudio de antiguos huesos de animales) ponen de manifiesto esta transformación. Eran los primeros campesinos, pueblos que hablaban lenguas desconocidas (de las cuales el vasco podría ser una reliquia), que utilizaban herramientas líticas y que, hace unos 9000 años, se encaminaron hacia Europa en busca de tierras vírgenes que cultivar.

Llegaron al continente por dos vías: en barco, a través del Mediterráneo; y a pie, a lo largo del Danubio, desde los Balcanes hasta la Europa central. Mediante datación con radiocarbono, se ha constatado que, hace unos 7500 años, las sociedades agrarias danubianas ya levantaban aldeas en la llanura panónica (territorio actual de Eslovaquia, Hungría y Rumanía), donde fundaron una cultura ceramista que los arqueólogos denominan «cultura de la cerámica de bandas» (LBK, por sus siglas en alemán) debido a las características franjas, en meandros y volutas, que decoran su alfarería.

Marchando rápidamente hacia el oeste, por los prados fértiles de lo que hoy es Alemania, la cultura LBK llegó al Rin en apenas un par de siglos, hace unos 7300 años. El análisis meticuloso de su evolución estilística, junto con la datación por radiocarbono, parece indicar que avanzaban en forma de «saltos», es decir, «cubriendo cientos de kilómetros de una vez, para luego poblar la tierra recorrida poco a poco», según el arqueólogo Detlef Gronenborn, del Museo Romano-Germánico Central de Maguncia. En algún momento aprendieron a fundir el cobre, tras lo cual se desarrolló un comercio de artículos de lujo de ese metal entre las comunidades agropecuarias.

En la ruta meridional, avanzaron siguiendo ese ritmo discontinuo a lo largo de la costa mediterránea, desde Italia hasta Francia y de allí a la península ibérica. Una vez alcanzada la costa francesa, hace unos 7800 años, pusieron rumbo al norte hacia la cuenca parisina, la llanura situada entre el Rin y el océano Atlántico, una especie de callejón sin salida a escala continental. Fue allí donde se encontraron los dos grandes flujos migratorios, hace unos siete milenios. Para entonces, sus culturas se habían diferenciado bastante, tras más de 500 años separadas, pero todavía se reconocían como la misma y se fusionaron tanto biológica como culturalmente.





LOS ESTUDIOS GENÉTICOS de las inhumaciones de Gougenheim, en Francia, indican que los individuos arrojados a la sepultura (*1*) tienen mayor ascendencia cazadora-recolectora que aquellos depositados con cuidado (*2*).

DE «MULTI-SCALE ANCIENT DNA ANALYSES CONFIRM THE WESTERN ORIGIN OF MICHELSBERG FARMERS AND DOCUMENT PROBABLE PRACTICES OF HUMAN SACRIFICE», ALICE BEAU ET AL. EN *PLOS ONE*, JULIO DE 2017. (HTTPS://DOI.ORG/10.1371/JOURNAL.PONE.0179742)

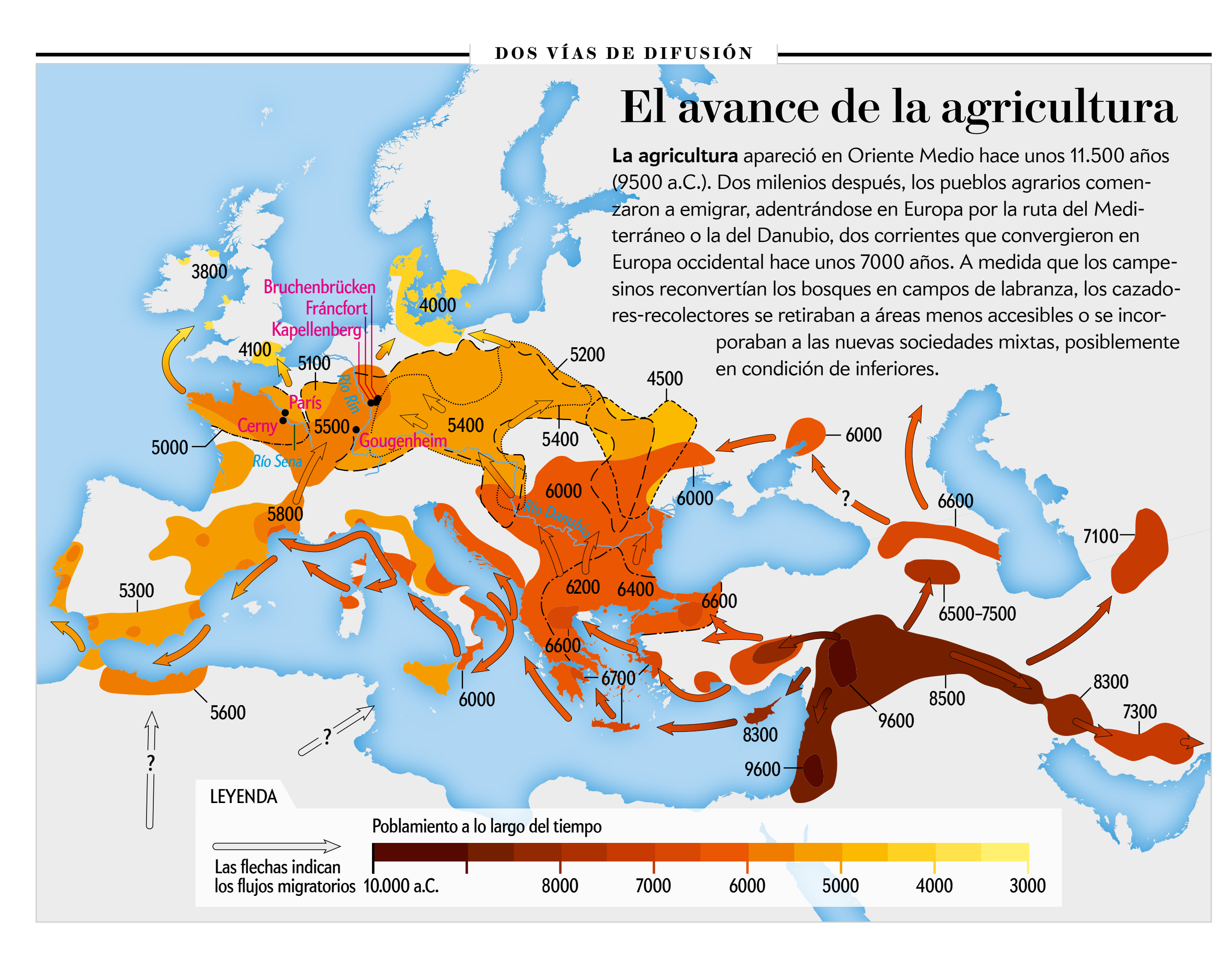
DEFORESTAR PARA CULTIVAR

Los primeros campesinos que se adentraron en Europa probablemente trajeron consigo a sus familias, tal como revela un estudio de 2017 dirigido por Amy Goldberg, antropóloga evolutiva por entonces en la Universidad Stanford, en el que se analizó el cromosoma X de 20 individuos del Neolítico europeo. A diferencia del cromosoma Y, que únicamente se hereda del padre, el cromosoma X puede heredarse del padre o de la madre. El equipo de Goldberg sostiene que el cromosoma X de esos 20 individuos procede, más o menos en la misma proporción, tanto de hombres como de mujeres de comunidades agrarias. Otras investigaciones concluyen que aquellas sociedades eran patrilocales: los bienes se transmitían por vía masculina y, al casarse, la mujer se trasladaba a vivir con la familia del varón. Se han obtenido pistas sobre la movilidad de las mujeres por la proporción de isótopos de estroncio en sus dientes, que refleja sus hábitos alimentarios, y por el influjo continuo de tendencias artísticas foráneas en sus comunidades, que quedan plasmadas en sus cerámicas. Se cree que eran las mujeres las que decoraban estas obras, igual que en las sociedades agrícolas posteriores.

En aquella época, Europa era un poco más húmeda y cálida que hoy, y estaba cubierta por espesos bosques. Como todos los inmigrantes, los campesinos habrían tardado un tiempo en adaptarse al nuevo medio, pero gradualmente fueron descubriendo la flora y la fauna dominantes en aquel clima temperado. Ganaron terreno a los bosques, parcela a parcela, modificándolos con técnicas silvícolas ancestrales, como cortar los árboles por la base para favorecer la aparición de vástagos o podarlos por la copa (descopado). La población de campesinos aumentaba y, cuando se quedaban sin tierra de labranza, la generación joven se mudaba, asentándose en lo que a ellos les parecían bosques deshabitados. «Es posible que no tuviesen la impresión de estar invadiendo territorio ajeno», conjetura Céline Bon, paleogenetista en el Museo del Hombre de París. Pero sí lo estaban invadiendo.

Tarde o temprano, los campesinos inmigrantes tuvieron que toparse con los moradores de aquellos bosques, un encuentro

DOS VÍAS DE DIFUSIÓN



que seguramente fue una conmoción. Habían transcurrido 40.000 años desde que sus antepasados comunes se dividieran en dos ramas al abandonar África, suficiente tiempo para diferenciarse física, cultural y lingüísticamente. La comparación de sus genes con los de los europeos actuales revela que los agricultores eran de talla más baja que los cazadores-recolectores occidentales, que ocupaban la mayor parte del continente. También tenían el cabello y los ojos oscuros, y probablemente la tez más clara. No hay indicios de violencia entre los dos grupos en los primeros encuentros, aunque faltan muchas piezas en el registro arqueológico, de modo que no es posible descartarla. En todo caso, en grandes zonas de Europa, los cazadores-recolectores de repente se desvanecen del registro genético y arqueológico, junto con su cultura mesolítica, en cuanto irrumpen los agricultores-ganaderos. ¿Adónde fueron?

Durante décadas, los arqueólogos se han preguntado si los cazadores-recolectores se retiraron, ante la llegada masiva de estas poblaciones foráneas, quizás a las montañas, donde la tierra era menos fértil y menos adecuada para el cultivo, o a las profundidades de los bosques, donde los campesinos los dejarían en paz. «Es posible que hubiese grandes colonias de cazadores-recolectores que sobrevivieran en esos entornos, no una generación sino quizá mil o dos mil años después de la llegada de las comunidades agrarias», sugiere Ron Pinhasi, arqueólogo y antropólogo de la Universidad de Viena.

Los cazadores-recolectores se quedaron en alguna parte, porque los europeos actuales llevan sus genes. Además, los estudios paneuropeos de ADN antiguo indican un «resurgimiento» mesolítico desde hace unos 6500 años, por el cual, con el paso del tiempo, los elementos genéticos de los cazadores-recolectores representan una parte cada vez más importante del genoma de los campesinos, si bien el resurgimiento no es solamente genético. «Más o menos en la misma época, vuelve a aparecer en el registro arqueológico la vieja manufactura mesolítica», explica el arqueólogo Thomas Perrin, de la Universidad Jean Jaurès de Toulouse. Los cazadores-recolectores ya no estaban allí, salvo quizás algunos grupos ocultos en el espesor del bosque, pero sí sus genes y su tecnología.

Cuando los campesinos se pusieron en marcha de nuevo para abandonar la encrucijada de la cuenca parisina, ya no eran el mismo pueblo que había partido de Hungría o que había bordeado el litoral mediterráneo, sino que portaban dentro de sí algo de la antigua Europa. Y eso plantea la siguiente pregunta: ¿cómo fue esa fusión entre gentes tan dispares?

UN CALEIDOSCOPIO

La respuesta es: caleidoscópica. No hay pruebas genéticas claras de que se produjera hibridación en la ruta de la Europa central hasta que los campesinos de la cultura LBK llegaron al Rin. Sin embargo, los grupos sí se entremezclaron de otras formas, posiblemente desde el principio. El hueso de un cazador-recolector hallado por Gamba en el asentamiento agrícola de Tiszaszőlős-Domaháza, en Hungría, nos ofrece un atisbo de aquellas interacciones, aunque no se sabe nada más de ese

FUENTES: MUSEO ROMANO-GERMÁNICO CENTRAL DE MAGUNCIA (ALEMANIA) E INSTITUTO DE ARQUEOLOGÍA ORIENTAL Y EUROPEA (AUSTRIA) CARTOGRAFÍA DE MAPPING SPECIALISTS, SEGÚN GRONENBORN, HOREJS, BÖRNER Y OBER, 2019 (MUSEO ROMANO-GERMÁNICO CENTRAL DE MAGUNCIA/INSTITUTO DE ARQUEOLOGÍA ORIENTAL Y EUROPEA, AUSTRIA)

individuo. ¿Pertenecía a la comunidad? ¿Fue capturado como rehén? ¿Pasaba por ahí?

Los estudios realizados posteriormente aclaran un poco la situación. En el yacimiento de Bruchenbrücken, al norte de Fráncfort, convivían agricultores-ganaderos con cazadores-recolectores, hace aproximadamente 7300 años, en lo que Gronenborn llama un «asentamiento multicultural». Parece que los cazadores hubiesen llegado desde el oeste para comerciar con los agricultores, que valoraban las industrias de los primeros, sobre todo las puntas de flecha finamente talladas en piedra. Quizás algunos cazadores-recolectores se quedaron y adoptaron la vida sedentaria. Los intercambios observados en Bruchenbrücken y otros enclaves fueron tan fructíferos, según Gronenborn, que detuvieron el avance de la agricultura hacia occidente durante un par de siglos.

También es posible que hubiese excepciones a la regla de que las dos poblaciones no se cruzaran antes. El yacimiento austríaco de Brunn 2, en un valle fluvial boscoso no lejos de Viena, se remonta a la primera oleada de agricultores LBK llegados a la Europa central, hace unos 7600 años. Hay tres enterramientos que son más o menos contemporáneos: dos, de personas de ascendencia campesina pura; el otro, de la primera generación de descendientes de cazadores y campesinos. Los tres yacen en posición fetal, de costado, pero al «cazador» lo acompañan seis puntas de flecha.

En 1990, cuando comenzaron las excavaciones en Brunn 2, se hallaron miles de fragmentos de piedra desperdigados, junto con ánforas de cerámica y flautas y figurillas de barro. Los arqueólogos determinaron que era un recinto sagrado para la celebración de rituales, o bien una especie de taller-mercado de la Edad de Piedra, o quizá todas esas cosas juntas. Alexey Nikitin, paleogenetista de la Universidad Estatal Gran Valley de Allendale (en Michigan) que ha trabajado en Brunn 2, asegura que, si era un lugar sagrado, las personas enterradas allí debían de gozar de una posición social elevada. Para él, el yacimiento atestigua el provecho mutuo que sacaron las dos culturas: «Los inmigrantes trajeron algo que los lugareños no tenían, pero los lugareños también tenían algo que ofrecer: su conocimiento del terreno».

En la ruta sur, en cambio, parece que los pueblos se mezclaron desde el principio. «En los dos primeros siglos de la llegada de los agricultores, ya encontramos individuos cuyo genoma está compuesto en un 55 por ciento de elementos de cazadores-recolectores», señala la paleogenetista Maïté Rivollat, de la Universidad de Burdeos, coautora de un análisis genético de restos humanos procedentes de sepulcros neolíticos del sur de Francia, publicado en *Science Advances* en mayo. Además, según la distribución del componente cazador-recolector en el genoma de los campesinos, Rivollat y sus colaboradores determinaron que el cruce llevaba produciéndose al menos desde cinco o seis generaciones, es decir que quizás comenzó apenas llegados los pioneros.

Curiosamente, en Francia no aparecen lugares donde los dos grupos puedan haber entrado en contacto, aunque Perrin los ha buscado. Lo más cerca que han estado de situar juntos, en el mismo lugar, a agricultores-ganaderos y cazadores-recolectores es en la gruta de Gardon, en las montañas del Jura, al este de Lyon, ocupada primero por granjeros neolíticos procedentes del sur y luego por cazadores mesolíticos, en ese orden y con muy poca diferencia entre unos y otros. «Dada la escasa separación en el tiempo que hay entre las dos ocupaciones, podemos aseverar que coexistieron, al menos en esta región», apunta Perrin.

¿Cómo pueden interpretarse estos hallazgos tan dispares? Polly Wiessner, antropóloga de la Universidad de Utah, que lleva mucho tiempo estudiando los cazadores-recolectores, no considera sorprendente esa variación regional. En épocas más recientes, cuando inmigrantes agrarios se han encontrado con grupos asentados de cazadores-recolectores, las relaciones entre ambos han dependido de sus respectivos objetivos económicos. «Si los inmigrantes desean colonizar la tierra o los recursos, deshumanizan a los nativos», argumenta. «Si hay posibilidad de cooperación, la respuesta es clasificar las relaciones para facilitar la interacción», es decir, etiquetar al otro como amigo o como interlocutor comercial.

Las colonizaciones más recientes de territorios de cazadores-recolectores por parte de comunidades agrarias también podrían servir para explicar por qué el resurgimiento mesolítico tardó tanto en producirse, unos 1500 años después de que llegaran a Europa los agricultores-ganaderos. Cuando los agricultores bantúes comenzaron a desplazarse hacia el África meridional hace 3000 años, se encontraron con los pigmeos que habitaban los bosques, un grupo de cazadores-recolectores con los que guardaban la misma distancia, en términos genéticos, que con los europeos. Lluís Quintana-Murci, genetista del Instituto Pasteur de París que ha trazado la historia de estos dos etnogrupos con estudios paleogenómicos, lo describe así: «Durante mucho tiempo, hubo transacciones comerciales entre los bantúes y los pigmeos, pero no mestizaje».

Los campesinos valoraban las industrias líticas de los cazadores-recolectores, en especial las puntas de flecha finamente talladas

Cuando finalmente comenzaron a emparejarse, más de 2000 años después del encuentro, eran las mujeres pigmeas las que se casaban con bantúes y se mudaban a sus comunidades, donde se las trataba —y se las sigue tratando— como inferiores, una clase socioeconómica más baja que además se diferencia fenotípicamente. Quintana-Murci subraya la relación ambivalente que tienen los bantúes con los pigmeos: «por un lado, los tratan como siervos; por el otro, les tienen miedo; en la mentalidad de los bantúes, los pigmeos son los amos del bosque y algunos tienen poderes chamánicos».

¿Por qué llegado el momento se derrumbaron las barreras biológicas? Nadie lo sabe, advierte Quintana-Murci, pero es probable que primero cayese alguna barrera de índole social. Quizás, al enriquecerse y estratificarse la sociedad bantú, los relegados a los últimos peldaños encontraron afinidad con los pigmeos marginados.

¿Fue gracias al derrumbe de las barreras sociales que los primeros agricultores de Europa se emparentaron con los cazadores-recolectores? Es difícil saberlo, pero la cultura de Cerny de la cuenca parisina nos da una pista. Tradicionalmente, los arqueólogos consideran Cerny como el último vestigio de la cultura LBK, ya que despuntó cuando esta comenzaba a adoptar otros elementos. Si esa premisa es correcta, los habitantes de Cerny tenían sangre agrícola, es decir, descendían de los primeros agricultores-ganaderos que se asentaron en la llanura panónica. Pero en las necrópolis de hace 6700 años, los hombres de alto rango están enterrados en decúbito supino, no en





LAS PUNTAS DE LANZA talladas en pedernal (*1*) excavadas en Kapellenberg (Alemania) evidencian la importancia de la caza en la cultura de Michelsberg. En un yacimiento cerca de Wiesbaden, se han hallado fragmentos de una vasija de arcilla con decoraciones características de la cultura agraria LBK (*en la fotografía 2, una réplica*).

posición fetal, y junto a ellos se dispusieron armas de caza y ornamentos fabricados con astas de ciervo, colmillos de jabalí y garras de aves rapaces. «Sus ritos funerarios le hablan a otro mundo, desde su entorno cotidiano», explica la arqueóloga Aline Thomas, del Museo del Hombre de París. «Aluden a la esfera de la naturaleza, a unos elementos asociados más bien con las poblaciones mesolíticas.»

Esos ritos han llevado a Thomas y Bon a preguntarse quiénes eran realmente las gentes de Cerny. ¿Eran campesinos que adoptaron la vida mesolítica hasta el punto de idolatrarla, o eran cazadores-recolectores conversos que en realidad nunca abandonaron aquellos hábitos? Bon y Thomas han analizado el ADN extraído de las necrópolis de Cerny para intentar dar respuesta a esos interrogantes. Por ahora han analizado el ADN mitocondrial (que se hereda por vía materna) y han descubierto que contiene elementos mesolíticos. Así pues, hubo mujeres cazadoras-recolectoras que se instalaron en Cerny para casarse con los hombres del lugar. Ese influjo posiblemente refleje lo que ocurría en otras comunidades agrícolas del mismo período, porque hace 6700 años el resurgimiento mesolítico (la aparición de genes de cazadores-recolectores en el genoma de los agricultores-ganaderos) ya estaba afianzado. Así que nos falta averiguar quiénes eran los varones de Cerny. Las investigadoras están analizando los cromosomas Y y los genomas completos de Cerny, con la esperanza de descubrir su origen genético.

Fuesen quienes fuesen las gentes de Cerny, sus sepulturas nos muestran una imagen fija del resurgimiento mesolítico que hubo en Europa. Al cabo de unos pocos siglos, todas las poblaciones europeas ya habrían adoptado la agricultura y la ganadería, aunque sus genes, y a veces también sus rituales, cuenten una historia más compleja.

LA APARICIÓN DE UNA JERARQUÍA

Hace unos 6500 años, se inició en Europa una nueva etapa. Hasta entonces, como se observa en Brunn 2, todos los enterramientos son individuales, incluso los de personas importantes; pero después de ese momento, en algunas regiones se levantan grandes túmulos sobre cámaras que albergan uno o dos difuntos. Los arqueólogos suponen que estos cambios reflejan una rotunda transformación social, quizá el nacimiento de la desigualdad, a medida que las sociedades agrarias generaban excedentes que no repartían de forma equitativa. De ser así, esas sociedades contarían en su seno con individuos de marcada ascendencia cazadora-recolectora, que todavía tenían un aspecto distinto del de sus vecinos de sangre agraria «pura» y posiblemente llevarían una existencia infeliz.

Un ejemplo es la cultura de Michelsberg, que data de hace 6400 años y probablemente se originó en la cuenca parisina, antes de que los agricultores-ganaderos migraran al este, hacia Alsacia y Alemania. Los habitantes de Michelsberg organizaban su territorio con fines defensivos; en la parte central, suele haber un asentamiento fortificado en el que residen varios miles de personas. Este núcleo está rodeado de un cinturón de asentamientos más pequeños y dispersos, más allá del cual hallamos lo que Gronenborn llama «zona fronteriza», habitada por colonias más desperdigadas. Esta estructura defensiva posiblemente refleja las tensiones entre comunidades colindantes, que chocaron unas con otras al crecer su población.

Los enterramientos de Michelsberg revelan una sociedad estratificada. En algunas ubicaciones —por ejemplo, en Bruchsal-Aue, cerca de Karlsruhe— la persona de alto rango yace en posición fetal, de costado, a la usanza LBK tradicional, mientras que a su alrededor hay otros individuos, en apariencia arrojados a la tumba de cualquier manera. La proporción de isótopos de estroncio en sus dientes indica que todas las personas enterradas juntas seguían la misma alimentación de base agropecuaria, pero su ADN revela que los individuos que rodean a la figura

central tienen, por norma general, una ascendencia cazadora-recolectora mucho más importante. Por otro lado, los restos de individuos de origen cazador-recolector a menudo están en zanjas o basurales. Según Gronenborn, estos hallazgos testimonian una sociedad que discriminaba por motivos sociales además de biológicos, en la que se valoraba poco la vida de las personas de rango inferior. Los individuos arrojados a una tumba de alto rango probablemente fueran esclavos o prisioneros de guerra, obligados a acompañar a su señor en la muerte, sostiene Gronenborn: «Creo que a esas personas las mataron para sepultarlas allí».

En un artículo de 2017, el grupo de la Universidad de Burdeos habla de «probables sacrificios humanos» en otro yacimiento asociado a la cultura de Michelsberg, en Gougenheim (Alsacia). Muchos de los individuos que parecen haber sido arrojados presentan amputaciones, y uno tiene signos de quemaduras, lo cual hace pensar que fueron sometidos a rituales. Como dato significativo, los investigadores secuenciaron el ADN mitocondrial de los dientes de 22 individuos y detectaron diferencias entre los que reposan en la sepultura y los que fueron arrojados en posiciones «atípicas». «Los individuos hallados en posiciones atípicas tienen un perfil mitocondrial heredado de cazadores-recolectores, a diferencia de los que yacen en la posición clásica», detalla Rivollat. La muestra es pequeña y el ADN mitocondrial solo aporta información sobre la línea materna, así que Rivollat prefiere no vincular el trato mortuorio de aquellas personas con su ascendencia, pero los datos sí apuntan a una sociedad estratificada que proscribía las relaciones entre determinados estratos, afirma la investigadora.

La población de Michelsberg alcanzó su apogeo hace 5700 años, cuando la violencia se intensificó, añade Gronenborn. Los asentamientos limítrofes se atacaban y masacraban continuamente unos a otros, tal como reflejan sus defensas cada vez más elaboradas y las aldeas abandonadas, junto con inhumaciones de cuerpos descoyuntados, sin elementos ceremoniales. Gronenborn se imagina «caras pintadas, cadáveres colgados de los árboles, algo parecido a las últimas escenas de *Apocalypse now*». En Kapellenberg, un yacimiento asociado a Michelsberg cerca de Fráncfort, las fortificaciones —todavía hoy parcialmente visibles— se hicieron más altas y más sólidas; se añadió una empalizada y luego un foso. Más adelante, hace unos 5500 años, la aldea que estas estructuras debían defender parece haber quedado abandonada.

¿APOCALIPSIS?

¿Se desató una masacre apocalíptica final o los aniquiló a todos la peste? Es difícil saberlo, opina Gronenborn. Casi mil años después de que Kapellenberg quedase deshabitada, llegaron pobladores nuevos y construyeron dos montículos rituales. Se trata de los yamna, que se desplazaron desde las estepas en carros, y como aportaron pocos cromosomas X al acervo genético europeo, según lo publicado por Goldberg en 2017, se deduce que su invasión fue eminentemente masculina. Otros arqueólogos, como Kristian Kristiansen, de la Universidad de Gotemburgo, han encontrado indicios de ADN de la bacteria causante de la peste en las piezas dentarias de los yamna, a raíz de lo cual planteó, en 2018, que estos pastores venidos del este causaron estragos en las comunidades agrícolas al traer con ellos la epidemia. Quizá fue así, señala Gronenborn, pero las investigaciones arqueológicas demuestran que las comunidades agrarias de la Europa central ya llevaban mil años en decadencia cuando los yamna llegaron a Kapellenberg. Si la población de los agricultores-ganaderos ya venía reduciéndose desde hacía tanto tiempo, tuvo que haber otras causas, y Gronenborn cree que los conflictos violentos eran una.

Antes de que aparecieran estos nuevos moradores, ¿qué pasó con los últimos cazadores-recolectores? ¿Salieron de su escondite para apropiarse de los bienes que habían dejado los agricultores —su ganado, su antaño floreciente comercio de artículos de cobre— y disfrutaron de una nueva vida como vaqueros y rapiñadores? Es una teoría que respalda Nikitin. Hay indicios de que los cazadores-recolectores seguían presentes. En 2013, un grupo dirigido por la paleogenetista Ruth Bollongino, en aquel momento en la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, anunció el descubrimiento de cazadores-recolectores y agricultores-ganaderos que compartían el mismo espacio fúnebre en la cueva de Blätterhöhle, en Alemania, pero mantenían culturas ancestrales distintas, hace tan solo 5000 años.

Estos hallazgos apuntan a una sociedad estratificada, en la que se valoraba poco la vida de las castas inferiores

Esa teoría, sumada a muchas otras sobre los factores que precipitaron el fin del Neolítico, se está analizando ahora que los paleogenetistas pueden indagar en la genética regional de la Europa de aquella época y relacionar sus averiguaciones con los estudios arqueológicos. Independientemente de cómo ocurriese, lo que a los yamna pudo parecerles un conjunto de comunidades agrarias homogéneas escondía en realidad un pasado más complejo. Con la irrupción de los yamna, que marca el inicio de la Edad de Bronce, por primera vez confluyen en el continente todos los componentes genéticos de los europeos modernos. Los europeos de hoy son un mestizaje triple de cazadores-recolectores mesolíticos, agricultores-ganaderos neolíticos y pastores yamna de la Edad de Bronce.

La llegada de los agricultores-ganaderos confirma lo que ahora sabemos de muchas otras épocas de la Prehistoria: que las personas siempre han migrado, han incorporado otros usos y costumbres, se han adaptado; y también han usurpado. En palabras de Nikitin, «la humanidad no tiene nada de estático». IyC

PARA SABER MÁS

The persistence of hunting and gathering: neolithic western temperate and Central Europe. Detlef Gronenborn, en *The Oxford handbook of the archaeology and anthropology of hunter-gatherers*. Dirigido por Vicki Cummings et al. Oxford University Press, 2014.

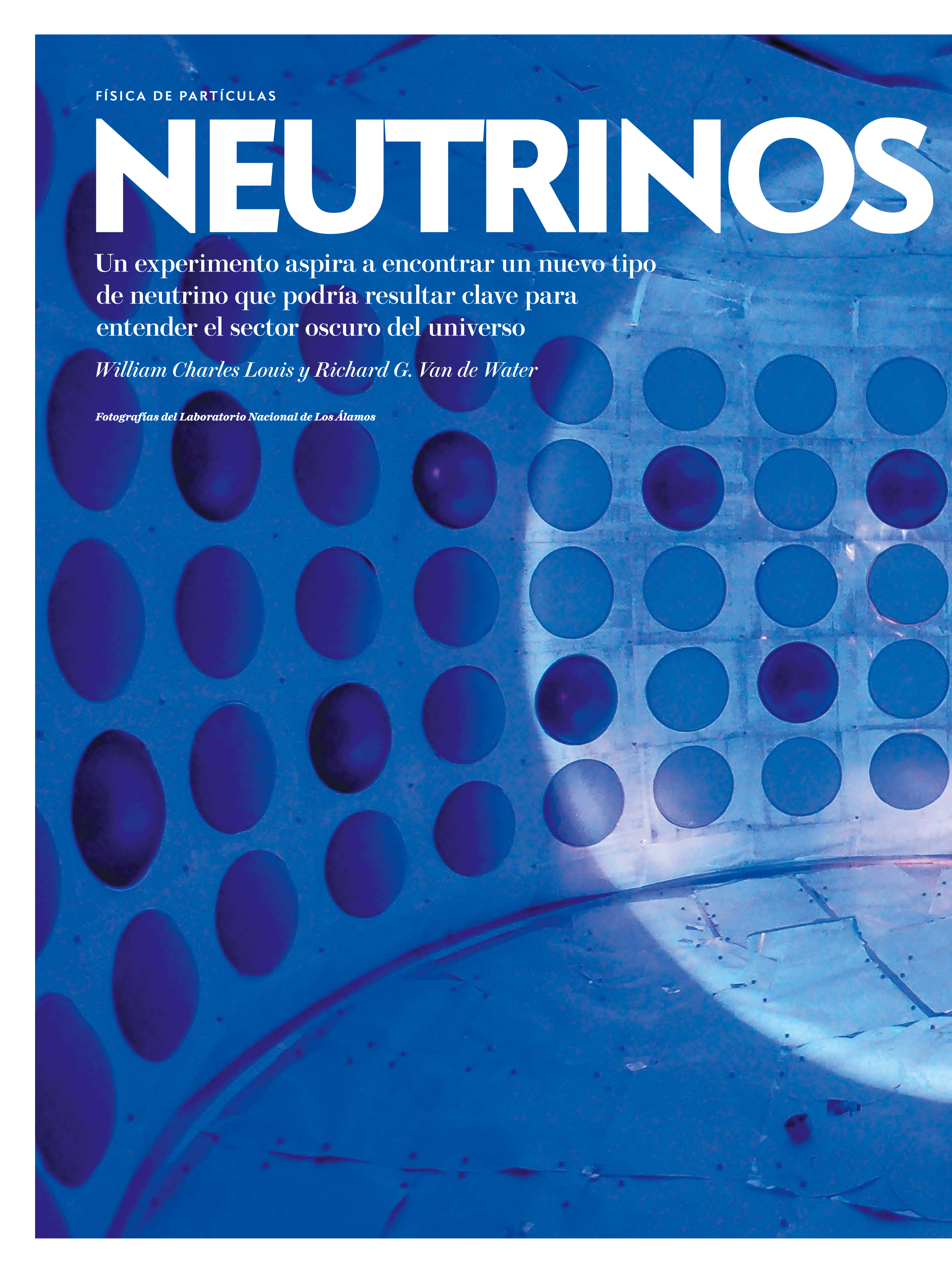
Cheddar man and mesolithic europeans: **www.youtube.com/watch?v=0JuK-BApolc**

EN NUESTRO ARCHIVO

Los comienzos de la agricultura en el noroeste de Europa. John M. Howell en *IyC*, enero de 1988.

Modelos matemáticos de la transición neolítica. Joaquim Fort en *IyC*, julio de 2015.

Los cautivos que cambiaron el mundo. Catherine M. Cameron en *IyC*, agosto de 2018.



FÍSICA DE PARTÍCULAS

NEUTRINOS

Un experimento aspira a encontrar un nuevo tipo de neutrino que podría resultar clave para entender el sector oscuro del universo

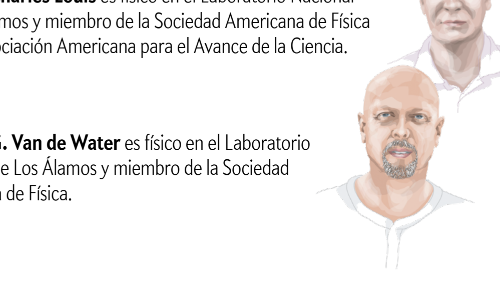
William Charles Louis y Richard G. Van de Water

Fotografías del Laboratorio Nacional de Los Álamos

OCULTOS



INTERIOR del detector del experimento Coherent CAPTAIN-Mills.



William Charles Louis es físico en el Laboratorio Nacional de Los Álamos y miembro de la Sociedad Americana de Física y de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia.

Richard G. Van de Water es físico en el Laboratorio Nacional de Los Álamos y miembro de la Sociedad Americana de Física.



Los físicos que asistieron a nuestra presentación en la Conferencia Internacional de Física y Astrofísica de Neutrinos celebrada en 2010 en Atenas seguramente esperaban que nos desdijésemos de un controvertido hallazgo de la década anterior. Y, en vez de eso, los dejamos mudos de asombro.

Todo había comenzado en 1996, cuando publicamos unos datos obtenidos con el Detector de Neutrinos con Líquido Centellador (LSND) del Laboratorio Nacional de Los Álamos, situado en Nuevo México. Esos resultados parecían entrar en conflicto con la idea generalmente aceptada de que los neutrinos (unas partículas diminutas y omnipresentes que atraviesan casi toda la materia) pueden ser de tres tipos o sabores, puesto que apuntaban a la posible existencia de un cuarto sabor aún no detectado. La comunidad científica se mostró escéptica y, de hecho, los datos preliminares de un experimento posterior hacían pensar que nuestros resultados de 1996 eran incorrectos: después de todo, no había un cuarto sabor de neutrino. Sin duda, aquel día en Atenas la audiencia esperaba que nuestros hallazgos más recientes desmintieran de una vez por todas los resultados del experimento LSND. Sin embargo, desvelamos que las pruebas a favor de un cuarto tipo de neutrino eran aún más convincentes.

No es que lo hubiéramos descubierto, pero nuestro trabajo en el experimento MiniBooNE (alojado en el Laboratorio Nacional Fermi, en Illinois) demostró que, casi con total seguridad, había un problema en nuestra manera de entender la física de partículas. Y la solución más plausible era que existiese un nuevo neutrino «estéril», llamado así porque no interaccionaría con el resto de la materia más que a través de la gravedad. Transcurrida una década desde nuestra presentación en Grecia, los datos de MiniBooNE han reforzado aún más la idea de que hay un cuarto tipo de neutrino.

En la actualidad, creemos que hay una probabilidad de más del 99,999999 por ciento de que exista algo más allá de la física conocida, y los neutrinos estériles son serios aspirantes a constituir ese algo. Aun así, la idea de que nuestros experimentos hayan detectado un cuarto neutrino sigue siendo controvertida, ya que el modelo estándar de la física de partículas —uno de los marcos teóricos mejor comprobados de la historia— solo admite tres sabores de neutrinos. No obstante, sabemos que el modelo estándar no es una teoría completa, ya que no explica la materia y la energía oscuras, las componentes invisibles que parecen dominar el cosmos. Y un nuevo sabor de neutrino podría aportar una conexión con ese territorio oculto. Tras años de incertidumbre, se están poniendo en marcha varios proyectos que podrían dilucidar este misterio, incluido nuestro propio experimento, llamado Coherent CAPTAIN-Mills (CCM).

EN SÍNTESIS

Los neutrinos pueden ser de tres tipos o sabores. Pero algunos experimentos muestran indicios de un cuarto sabor, un neutrino «estéril» que no sentiría ninguna fuerza salvo la gravedad.

Si existen los neutrinos estériles, nos llevarán más allá del modelo estándar de la física de partículas y podrían proporcionar una conexión con la materia y energía oscuras.

Varios experimentos intentan verificar la existencia de los neutrinos estériles, como el Coherent CAPTAIN-Mills, que busca caídas en el número de neutrinos detectados a diferentes distancias de la fuente.

¿QUÉ ES UN NEUTRINO ESTÉRIL?

Los neutrinos son partículas fantasmales. Billones de ellos nos atraviesan cada segundo, casi a la velocidad de la luz. Con todo, los neutrinos estériles serían aún más fantasmales: al no experimentar la fuerza electromagnética, la fuerte ni la débil (a través de las que interaccionan otras partículas), serían esencialmente indetectables. Eso los convertiría en parte de ese reino oculto que los físicos llaman el sector oscuro, donde habitan la energía y materia oscuras que representan el 95 por ciento de la densidad de energía del universo. Los neutrinos estériles podrían interaccionar con la materia oscura a través de fuerzas de la naturaleza aún desconocidas, y hasta podrían ser la materia oscura: algunas teorías afirman que estas partículas podrían conformar una parte o incluso la mayoría de la materia invisible del cosmos.

Si existiesen los neutrinos estériles, estaríamos ante la más reciente de las sorpresas que esta desconcertante familia de partículas ha deparado a los físicos. La primera llegó en la década de 1960, cuando los experimentos diseñados para detectar los neutrinos procedentes del Sol registraron muchos menos de los previstos. Todas las estrellas obtienen su energía a partir de reacciones de fusión nuclear en las que los protones se combinan para formar núcleos de helio, que a su vez se funden en elementos más pesados. Entre los productos de estas reacciones están los neutrinos electrónicos (uno de los tres sabores conocidos, junto con los neutrinos muónicos y los tauónicos). La teoría predice la llegada de un flujo continuo de esas partículas desde el Sol, pero los experimentos solo midieron una pequeña fracción del número esperado. Este déficit se bautizó como el problema de los neutrinos solares.

Al principio, muchos físicos supusieron que en realidad no entendíamos bien los procesos que tenían lugar en el Sol. Pero el verdadero problema resultó ser a la vez más simple y mucho más profundo: no es que el Sol emitiese menos neutrinos, sino que las partículas no llegaban a los detectores de la Tierra o, mejor dicho, cambiaban por el camino.

Los científicos acabaron comprendiendo que los neutrinos no son objetos puros: cada uno es una mezcla de todos los sabores y puede oscilar entre ellos durante su viaje. Este hallazgo resultó sorprendente por varias razones. Para empezar, el hecho de que los neutrinos cambien de sabor significa que no pueden ser partículas sin masa que viajan a la velocidad de la luz, como predice el modelo estándar. Esto es consecuencia de la teoría especial de la relatividad de Einstein, que afirma que el tiempo transcurre más lentamente para un objeto en movimiento que para uno en reposo. A medida que aumenta la velocidad del objeto, el tiempo se ralentiza, y acabaría por detenerse a la velocidad de la luz.

Eso implica que para una partícula que viaja a la velocidad de la luz, el tiempo parece congelado. Pero si los neutrinos alteran su sabor, están cambiando, por lo que experimentan el tiempo y tienen que moverse más despacio que la luz. Y según la relatividad especial, eso significa que deben tener masa, lo cual supone un problema para el modelo estándar. Los físicos

LOS NEUTRINOS ORDINARIOS

Sabores de neutrinos

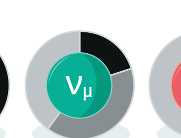
Los neutrinos se cuentan entre las partículas más sorprendentes del universo. Poseen una masa muy pequeña (pero no nula, como se esperaba) y viajan casi a la velocidad de la luz, sin interaccionar prácticamente nunca con el resto de la materia. Estas huidizas partículas ayudan a los científicos a entender algunas de las cuestiones más fundamentales de la física.

Las propiedades de los neutrinos

Hay tres tipos o sabores de neutrinos: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico.



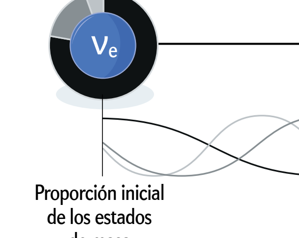
Los sabores en realidad no son estados puros, sino una mezcla o superposición de tres posibles estados de masa.

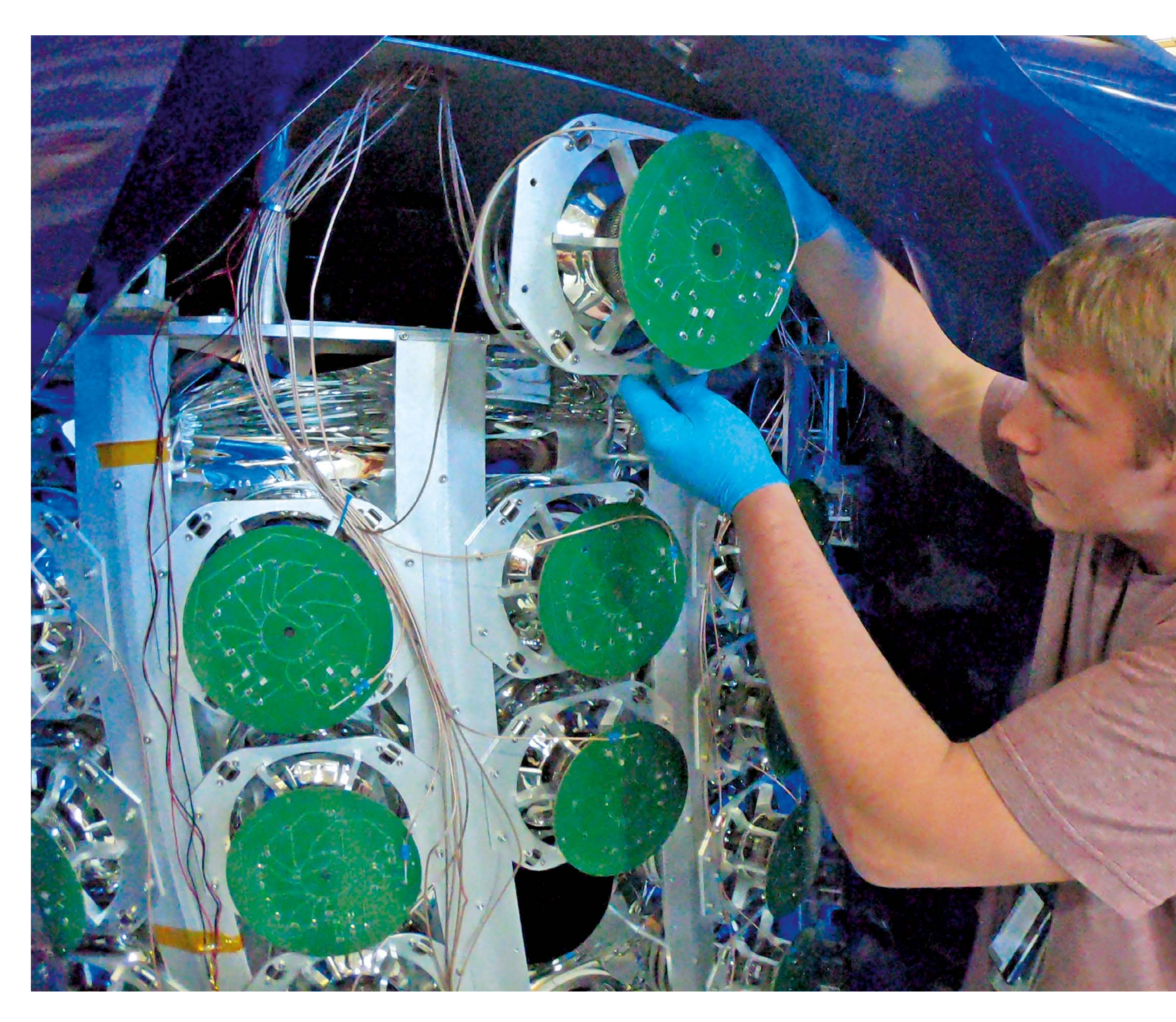
Aún no sabemos la masa de cada uno de esos estados, aunque las tres son diminutas. La teoría indica que, o bien hay dos masas muy pequeñas y una algo mayor (jerarquía normal), o al revés: una muy pequeña y dos algo mayores (jerarquía invertida).

Oscilación de sabores

Cuando un neutrino viaja a través del espacio, cada estado de masa lo hace a un ritmo ligeramente distinto. Con el tiempo, esa diferencia altera la mezcla de los estados de masa y hace que el neutrino cambie de sabor, en un proceso denominado oscilación. Así, una partícula puede comenzar como neutrino electrónico y acabar siendo un neutrino tauónico.



LUCY READING-IKKANDA



UN INVESTIGADOR del experimento Coherent CAPTAIN-Mills retira un tubo fotomultiplicador para reemplazarlo, como parte de una mejora del detector de neutrinos.

Takaaki Kajita y Arthur B. McDonald recibieron el premio Nobel de física en 2015 por el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos [*véase* «La resolución del problema de los neutrinos solares», por Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark; Investigación y Ciencia, junio de 2003].

SEÑALES SORPRENDENTES

Esta inesperada capacidad de los neutrinos para cambiar de sabor es lo que estábamos estudiando en las décadas de 1990 y 2000 (junto a otros físicos) con LSND y MiniBooNE cuando nos encontramos con persistentes indicios de la existencia de más neutrinos. Ambos experimentos empleaban aceleradores de partículas para generar un flujo continuo de neutrinos muónicos y registraban los neutrinos electrónicos mediante detectores situados a una determinada distancia.

Si pudiéramos acompañar a un neutrino que se desplaza libremente, veríamos que oscila de un sabor a otro, pasando por todos ellos de manera cíclica. Los sabores electrónico, muónico y tauónico serían observables, al menos en principio. Pero si existiera una variedad estéril, los neutrinos también podrían transformarse en ese cuarto sabor. Para un observador que viajara con la partícula, esta simplemente desaparecería durante una parte del vuelo. En el caso más sencillo, el neutrino reaparecería al cabo de un tiempo con uno de sus tres sabores normales, aunque también existe la posibilidad teórica de que un neutrino estéril se desintegre y ponga fin al ciclo de oscilaciones.

Normalmente, las oscilaciones entre los tres sabores conocidos solo ocurren a lo largo de grandes distancias. Sin embargo, como es probable que los neutrinos estériles sean más masivos que los sabores ordinarios, las partículas podrían cambiar a esa nueva variedad (y luego volver a uno de los sabores normales) con más rapidez. Por lo tanto, si los neutrinos estériles existen, deberían acelerar el proceso de oscilación y reducir drástica-



EL DETECTOR DE NEUTRINOS del proyecto Coherent CAPTAIN-Mills es extraído de su tanque, que se llena de argón líquido durante el experimento.

mente la distancia que viaja, por ejemplo, un neutrino muónico antes de convertirse en electrónico.

Y eso es justamente lo que habíamos hallado en nuestros experimentos anteriores: que los neutrinos muónicos desaparecían mucho más deprisa de lo esperado al alejarse de su fuente y aparecían más neutrinos electrónicos de los previstos. Observamos oscilaciones para distancias de entre decenas y cientos de metros, en lugar de las decenas o cientos de kilómetros que anticipábamos. No debería ser posible que tantos neutrinos muónicos mutaran en neutrinos electrónicos en trayectos así de cortos, a no ser que se estuviesen transformando en neutrinos estériles por el camino.

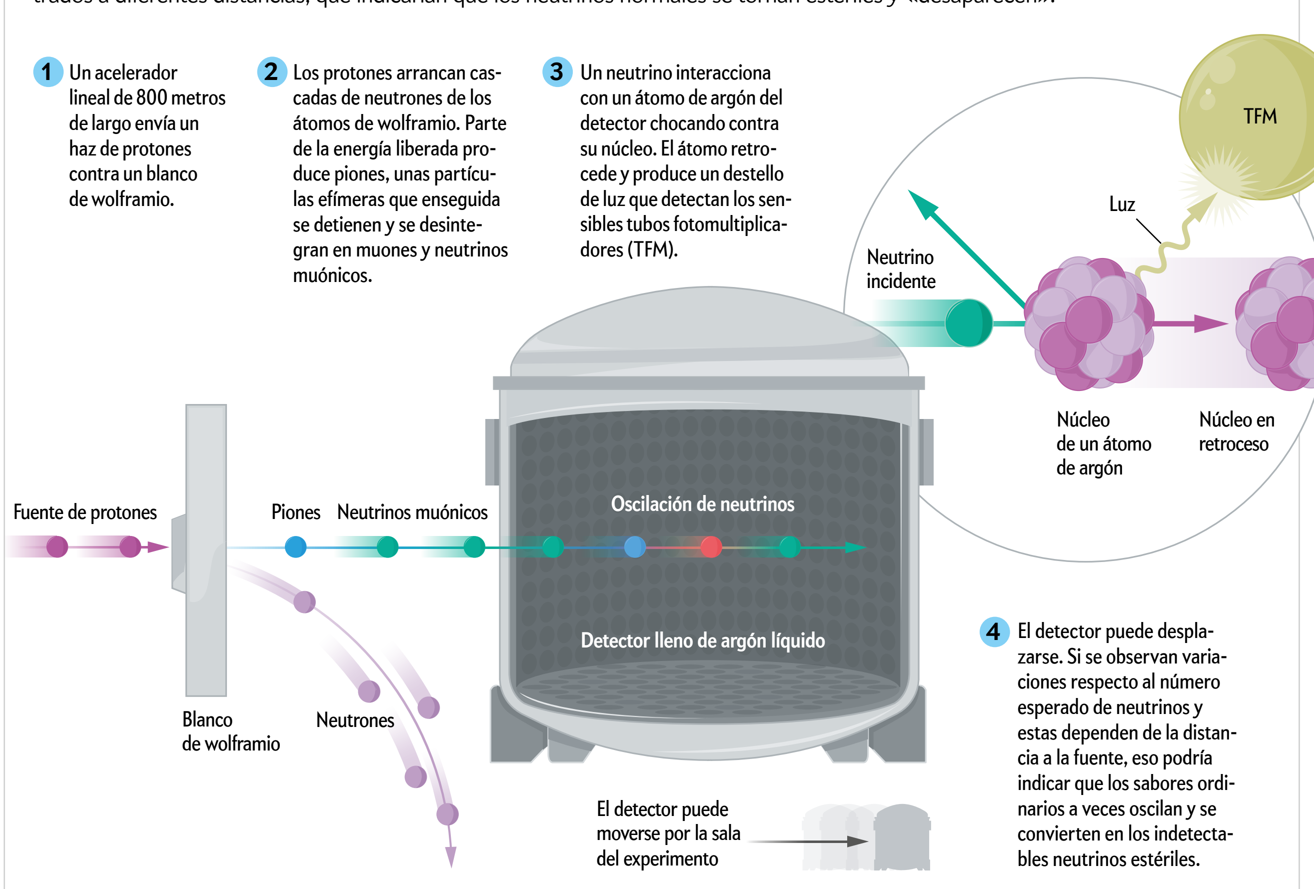
Nuestros experimentos no son los únicos que han arrojado resultados anómalos. Algunos detectores de neutrinos instalados cerca de reactores nucleares (los cuales generan neutrinos como subproducto, igual que el Sol) también aportan indicios de que algo no cuadra. Estos proyectos han detectado un número inesperadamente bajo de neutrinos, lo que sugiere que algunas partículas podrían haberse convertido en neutrinos estériles en su viaje desde el reactor. No obstante, estos resultados son más difíciles de interpretar, ya que los físicos no saben con certeza cuántos neutrinos se producen en los reactores de fisión. Por ello, registrar menos neutrinos de los previstos podría indicar la existencia de un cuarto sabor o, simplemente, que los científicos han sobreestimado la cantidad de partículas que deberían observar [*véase* «¿Producen los reactores nucleares neutrinos estériles?», por Alejandro Algora y José Luis Taín; Investigación y Ciencia, marzo de 2020].

En Rusia, el Detector de Antineutrinos de Reactor basado en Centelleador Plástico de Estado Sólido (DANSS) trata de sortear estas incertidumbres. Este experimento se localiza bajo un reactor nuclear, pero los científicos varían la distancia entre el reactor y el detector de neutrinos cada pocos días, a fin de comprobar si los neutrinos electrónicos realmente están cam-

EL EXPERIMENTO COHERENT CAPTAIN-MILLS

Contar neutrinos

El experimento Coherent CAPTAIN-Mills busca indicios de un cuarto sabor de neutrino: el neutrino estéril. Los sabores ordinarios interaccionan muy raramente con otras partículas, pero los neutrinos estériles no lo harían nunca y solo se comunicarían con el resto del universo a través de la gravedad. Si existieran estas partículas, los neutrinos ordinarios podrían oscilar para convertirse en estériles, y viceversa. El experimento no detectará los neutrinos estériles, pero revelaría descensos en el número de neutrinos registrados a diferentes distancias, que indicarían que los neutrinos normales se tornan estériles y «desaparecen».



LUCY READING-IKKANDA

biando de sabor a medida que se alejan de su fuente. Con esta táctica, los investigadores pueden determinar si se producen oscilaciones a distancias cortas aun sin saber el número preciso de neutrinos que genera el reactor.

El enorme observatorio de neutrinos IceCube, una red de fotodetectores de un kilómetro cúbico de volumen enterrada en el hielo de la Antártida, también busca neutrinos estériles. La red registra la llamada radiación de Cherenkov, una señal luminosa originada cuando un neutrino de alta energía procedente de la atmósfera superior interacciona con el hielo y da lugar a una cascada de partículas. Estudiando esa radiación, los científicos pueden conocer el tipo, la energía y la dirección de vuelo del neutrino que desencadenó el proceso [*véase* «IceCube: Astrofísica desde el hielo», por Carlos Pérez de los Heros; Investigación y Ciencia, marzo de 2013].

El equipo de IceCube acaba de publicar en el repositorio arXiV un análisis (basado en ocho años de datos) de los neutrinos que han llegado a sus detectores tras atravesar la Tierra. Este estudio buscaba indicios de la desaparición de neutrinos muónicos, la cual (de producirse) podría implicar la existencia de neutrinos estériles, en consonancia con los resultados de LSND y MiniBooNE. Sin embargo, no han hallado pruebas sólidas en ese sentido.

Los indicios a favor de los neutrinos estériles son intrigantes y sugerentes, pero aún no pueden considerarse decisivos. Los neutrinos que estudia IceCube poseen un amplio abanico de energías, lo cual complica el análisis de sus oscilaciones. Y en los experimentos con reactores resulta difícil distinguir los neutrinos que persiguen los investigadores de los neutrinos «de fondo», producidos por el Sol y por las desintegraciones radioactivas de los materiales del detector, y que pueden enmascarar la señal buscada.

Algunos experimentos, como LSND y MiniBooNE, permiten conectar y desconectar los aceleradores que generan los neutrinos para determinar el ruido de fondo, pero siguen presentando limitaciones relacionadas con el hecho de que solo podamos buscar neutrinos en un pequeño intervalo de distancias. En general, los métodos que hemos usado hasta ahora para registrar neutrinos se han basado en grandes detectores inmóviles que reducían nuestra flexibilidad. Esos proyectos nos proporcionan

un fotograma de la película, pero para comprender todo el argumento lo que necesitamos es una secuencia de fotogramas.

UNA ESTRATEGIA NOVEDOSA

Hay un nuevo tipo de experimentos que deberían permitirnos captar esos fotogramas. Como hemos mencionado, lo ideal sería viajar junto a un neutrino para ver cómo oscila. Aunque eso sea imposible, los nuevos experimentos ofrecen una manera de tomar instantáneas durante el proceso de oscilación, lo que podría revelar huellas de los neutrinos estériles, si es que existen. Entre estos proyectos están el Programa de Neutrinos de Línea de Base Corta del Fermilab y el experimento CCM que estamos poniendo en marcha en Los Álamos.

Nuestro experimento se desarrolla en una sala del Centro de Ciencia de Neutrones de Los Álamos (LANSCE), al final de un acelerador de partículas de 800 metros de longitud que envía un haz de protones contra un blanco de wolframio. Cuando los protones impactan con los átomos de wolframio, arrancan una cascada de neutrones a través de un proceso llamado espalación. Parte de la energía liberada genera piones, unas partículas efímeras que enseguida se detienen y se desintegran en muones y (lo que es más importante para nuestros intereses) neutrinos muónicos con una energía muy concreta.

Los neutrinos se detectan mediante la dispersión coherente, un efecto basado en el hecho de que todas las partículas —y en particular los neutrinos— se comportan no solo como pequeñas canicas, sino también como ondas. Esta dualidad onda-corpúsculo es una de las piedras angulares de la mecánica cuántica. La longitud de onda asociada a una partícula depende de su energía: cuanto más energética sea (cuanto más deprisa se mueva), menor será su longitud de onda.

Cuando un neutrino con longitud de onda corta choca con un núcleo atómico, interacciona con uno solo de sus protones o neutrones. Pero si la energía del neutrino es lo bastante baja como para que su longitud de onda sea comparable al diámetro del núcleo, ocurre algo especial: el neutrino interacciona con todo el núcleo, en vez de hacerlo con un solo protón o neutrón. Podemos establecer una analogía con las olas que golpean un barco: un buque grande apenas se verá afectado por una serie de pequeñas ondas en el agua, pero una ola con gran longitud de onda en mar abierto lo elevará de manera espectacular. Así pues, los neutrinos con longitudes de onda largas interaccionan con el núcleo atómico como un todo, y la probabilidad de observar esta clase de impactos es mucho mayor a energías bajas.

Este tipo de dispersión se llama «coherente» porque la longitud de onda del neutrino es similar al tamaño del núcleo. Al recibir el golpe, el átomo retrocede. Si la interacción ocurre en un material adecuado, tal retroceso produce un pequeño destello de luz, mientras que el neutrino continúa su camino en una dirección ligeramente distinta a la que traía. Si captamos el destello con un detector muy sensible (un tubo fotomultiplicador), podemos saber dónde y cuándo se produjo la colisión, así como la energía cinética del átomo. Aunque la dispersión coherente no revela el sabor de cada neutrino dispersado, sí permite medir la suma de las interacciones de los tres sabores conocidos. Este hecho es crucial: si dicha suma no coincide con el número esperado de neutrinos, eso podría indicar la presencia de neutrinos estériles, que al no interaccionar con el argón no producirían destellos de luz.

Dado que en estos experimentos es más probable que el neutrino interaccione con todo un núcleo atómico que con uno solo de sus nucleones, podemos usar detectores más pequeños en vez de los colosales instrumentos que se precisaban en el pasado. Frente al tanque de 800 toneladas de aceite mineral de MiniBooNE, el detector del experimento CCM contiene solo 10 toneladas de argón líquido. Al ser un detector compacto, podemos desplazarlo y observar los neutrinos a diversas distancias de la fuente. Si las partículas sufren suficientes oscilaciones en las decenas de metros que mide la sala del LANSCE, observaremos que el número total de interacciones es menor que el esperado, y que esta discrepancia varía con la distancia. Eso sería una prueba concluyente de que los neutrinos se están convirtiendo en neutrinos estériles. De hecho, con solo tres sabores no deberíamos ver oscilaciones a lo largo de distancias tan pequeñas.

Por supuesto, es posible que el experimento CCM no halle indicios de los neutrinos estériles. En ese caso, las observaciones de los neutrinos conocidos disminuirán de forma continua a medida que alejemos el detector del blanco de wolframio, igual que el brillo aparente de una bombilla se reduce conforme nos apartamos de ella.

No detectar neutrinos estériles sería decepcionante, pero no descartaría la posibilidad de que existan uno o más tipos de ellos. Lo que sí nos permitiría es acotar sus propiedades: dado que las oscilaciones dependen de las masas relativas de los neutrinos y de los llamados ángulos de mezcla, no encontrar signos de un cuarto sabor nos revelaría qué valores de estos parámetros son menos probables. De este modo, restringiríamos los intervalos a explorar en futuras búsquedas de los neutrinos estériles.

MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

A los físicos experimentales que presentan resultados en desacuerdo con el modelo estándar de la física de partículas se les suele considerar culpables hasta que se demuestre lo contrario, porque los científicos que han puesto en duda esta teoría en el pasado se han equivocado. No obstante, sabemos que el modelo estándar no es una teoría completa: las propias oscilaciones de los neutrinos son una prueba de ello.

Desde 1956, cuando Frederick Reines y Clyde Cowan (nuestros predecesores en Los Álamos) descubrieron los neutrinos, la investigación de estas partículas elementales ha dado lugar a nuevos y apasionantes avances en física. Aunque los neutrinos estériles siguen siendo un tema polémico 25 años después de que halláramos los primeros indicios de su existencia, los nuevos experimentos están a punto de resolver esta larga controversia, en un sentido o en otro. IyC

PARA SABER MÁS

Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment. Alexis A. Aguilar-Arevalo et al. en *Physical Review Letters*, vol. 121, n.º 22, art. 221801, noviembre de 2018.

Bounds on non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data. Sergei V. Demidov en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020, n.º 3, art. 105, marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

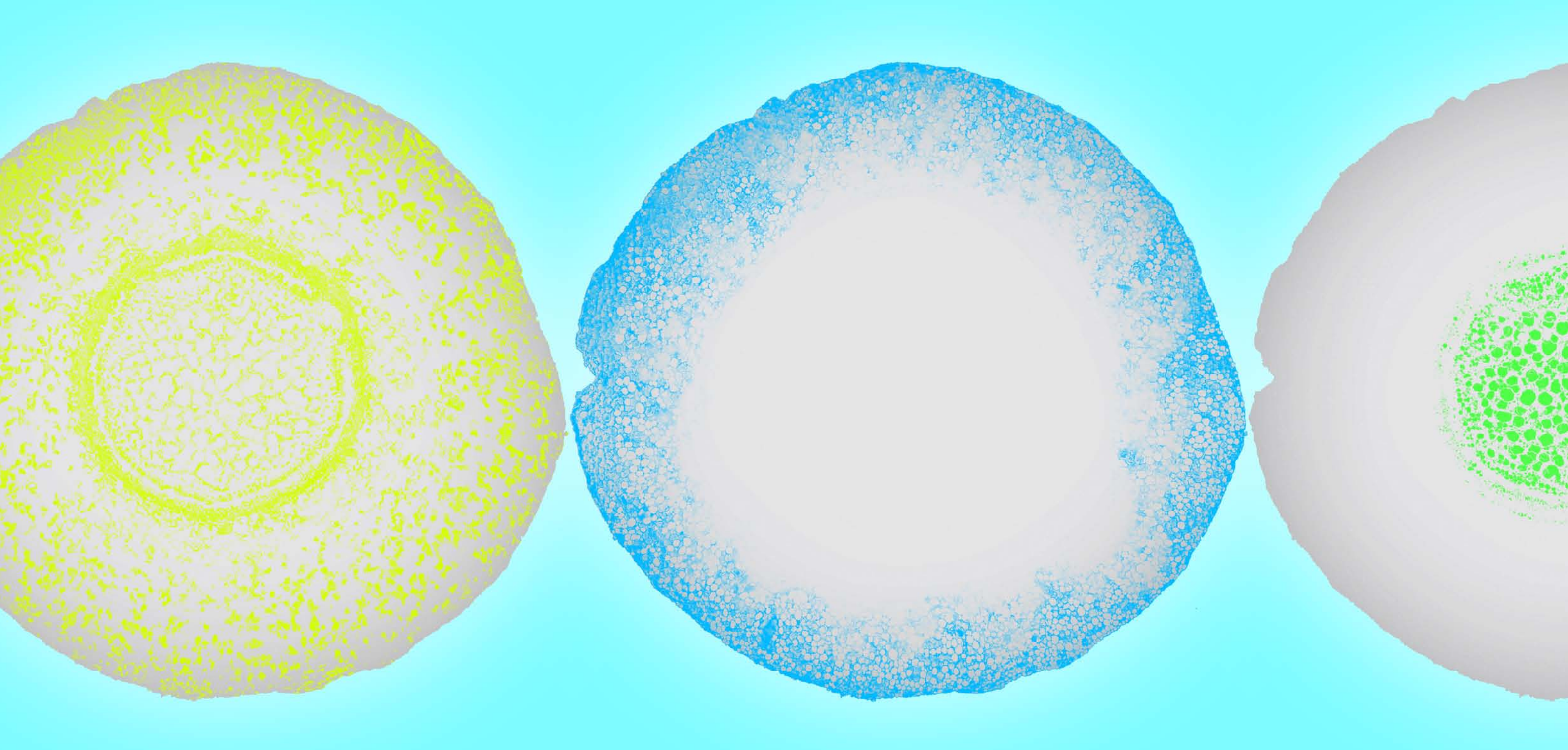
Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.

El papel de los neutrinos en la evolución del universo. Licia Verde en *IyC*, abril de 2015.

El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz en *IyC*, diciembre de 2017.

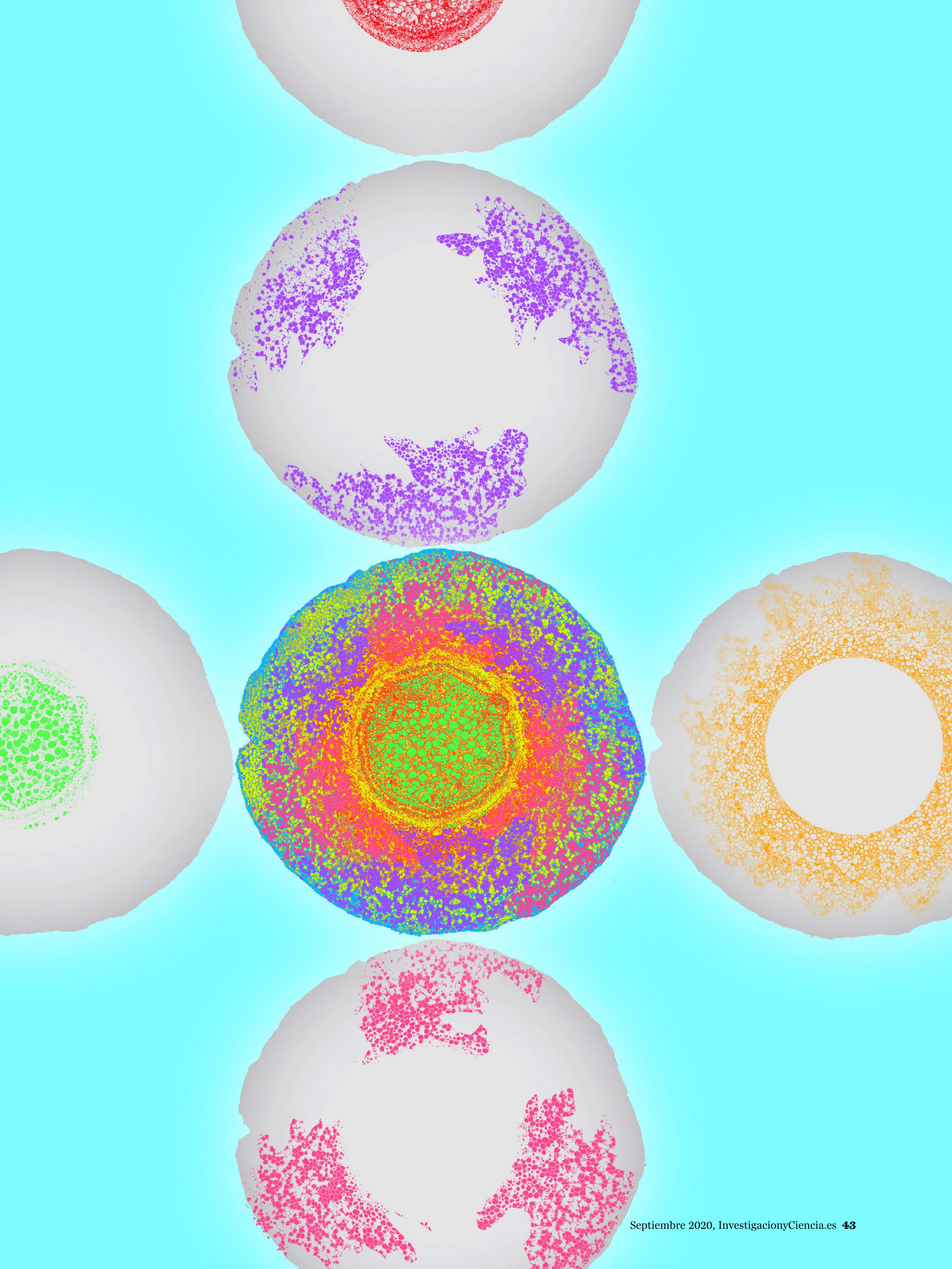
GENÓMICA

UNA VISIÓN MÁS NÍTIDA DE LOS SECRETOS CELULARES



Un nuevo enfoque metodológico basado en la superposición de múltiples capas de información arroja nueva luz sobre la identidad y la función celular. Denominado «secuenciación multimodal de células individuales», fue declarado método del año 2019

Maria Colomé Tatché



Maria Colomé Tatché dirige el grupo de epigenética computacional en el Instituto de Biología Computacional del Centro de Investigación Helmholtz en Múnic.



DURANTE DECENIOS, LOS CIENTÍFICOS QUE INTENTABAN DESENTRAÑAR LAS COMplejidades del mundo celular han basado su trabajo en generalizaciones y promedios de conjuntos. Pero poco a poco se ha hecho evidente una realidad bien distinta: cada célula es única. Cada célula tiene su propia vida interior, rica y compleja. De poco sirve estudiar un tejido globalmente, por ejemplo. Necesitamos saber qué ocurre en cada rincón, en cada una de su células. En consecuencia, durante los últimos años, numerosos investigadores han recurrido a métodos que permiten obtener información de las células individuales.

Pero no se han detenido aquí. Han visto que estas capas de información biológica (el genoma, el transcriptoma, el proteoma y el epigenoma) representan a diferentes personajes de una historia más amplia, que interactúan y se influyen mutuamente de manera que no se puede discriminar a ningún elemento por sí solo. Es decir, que lo interesante y realmente revelador es la suma de estas capas de información. La conciencia de esta interconectividad ha impulsado una notable innovación en el desarrollo de lo que se ha denominado «secuenciación multimodal de células individuales», que combina, en una sola célula, la medición del genoma, el transcriptoma, el epigenoma, el proteoma, etcétera. Esta nueva estrategia permite, por ejemplo, revelar cómo las variaciones en el ADN o en el patrón de metilación afectan a la expresión de los genes, o asociar la transcripción de los genes con la producción de diversas proteínas.

La combinación de técnicas «ómicas unicelulares» entraña, pues, un gran potencial. Sin embargo, no es nada trivial. Requiere un cuidadoso refinamiento experimental y sofisticadas herramientas computacionales, muchas de las cuales se encuentran todavía en las primeras etapas de desarrollo. Con todo, este enfoque múltiple encierra la promesa de lograr una comprensión sin precedentes de la forma en que los ecosistemas interiores de las células configuran su función biológica y su interacción en la salud y en la enfermedad. Es por ello por lo que fue declarado método del año 2019 por la revista *Nature Methods*.

En este artículo esbozaremos cuál ha sido el desarrollo y la evolución de la secuenciación multimodal de células individuales, así como sus principales retos y potencialidades. Dado que esta novedosa estrategia no corresponde a un solo método, sino que engloba técnicas tan numerosas que sería imposible explicarlas todas en tan pocas páginas, nos centraremos en las que se aplican al estudio de la epigenética.

ANTEDECENTES: LA SECUENCIACIÓN DE CÉLULAS INDIVIDUALES

Todas las células de nuestro cuerpo contienen el mismo ADN. Sin embargo, no todas realizan las mismas funciones. Bien al contrario: mientras unas bombean sangre, otras transmiten señales nerviosas y otras nos defienden de los virus, por poner algunos ejemplos. Ello se debe a que cada tipo de célula expresa un conjunto distinto de genes, que activan procesos celulares muy diferentes. Así, un mismo genoma puede generar una gran diversidad de programas de expresión genética. Este proceso está regulado por el epigenoma: el conjunto de sistemas de regulación capaces de cambiar la expresión de los genes de una célula sin modificar su genoma. Corresponden a estos sistemas

EN SÍNTESIS

Un nuevo enfoque metodológico, la secuenciación multimodal de células individuales, está revolucionando la biología celular.

Se basa en la superposición de varias capas de información «ómica» (genoma, metiloma, transcriptoma, proteoma, etcétera) correspondientes a células individuales.

Esta suma de capas permite ver la interacción entre los distintos elementos y sistemas que participan en la regulación genética.

Pese a que plantea importantes retos experimentales y computacionales, ya se está aplicando al estudio del desarrollo embrionario y a otros campos de gran relevancia, como el cáncer.

de regulación los grupos de metilación (metiloma), las modificaciones químicas de las histonas (las proteínas que se asocian al ADN para empaquetarlo en la célula) y la configuración tridimensional del genoma.

Como mamíferos, todas nuestras células provienen de una primera célula, el zigoto. Tras nueve días de divisiones celulares, este genera entre 200 y 300 células que empiezan a diferenciarse entre ellas para crear los órganos que formarán el feto. Esta diferenciación celular embrionaria está coordinada por el epigenoma y constituye posiblemente uno de los procesos más importantes para la biología y la biomedicina. Sin embargo, conocemos muy poco sobre él. Ello se debe a que, hasta hace escaso tiempo, los métodos para la secuenciación del genoma (ADN), el transcriptoma (conjunto de moléculas de ARN transcritas a partir del ADN) o el epigenoma requerían muestras compuestas de millones de células. En cambio, un embrión contiene solo unos pocos centenares.

Para poder estudiar procesos como el desarrollo embrionario, se crearon los llamados «métodos de secuenciación de células individuales». Los experimentos pioneros, de 2009, se centraron en medir el transcriptoma en cada célula. Ello permitió acceder por primera vez a los rasgos celulares individuales. Sin embargo, el transcriptoma nos informa solo sobre el estado de la célula en un momento dado. Ofrece la «foto» de una determinada expresión genética, pero no nos permite saber qué mecanismos de regulación la han generado. Para ello es necesario medir el epigenoma.

Una de las capas de información que conforman el epigenoma corresponde al metiloma, es decir, el estado de metilación del ADN. Cuanto mayor es la metilación en el promotor de un gen (la secuencia de ADN que se encuentra justo al lado del gen y que controla el inicio de la transcripción), menor es la expresión de ese gen. En 2013 llegaron los primeros experimentos de secuenciación del epigenoma de una sola célula. El primero de ellos, publicado en *Genome Research* por Hongshan Guo, de la Universidad de Pekín, y sus colaboradores, analizó la evolución de la metilación del ADN durante las primeras fases del desarrollo del zigoto en ratones.

En 2015 se desarrolló un método de secuenciación de células individuales que medía otro aspecto clave de la regulación genómica: la accesibilidad del ADN. Permite determinar qué partes del cromosoma presentan una configuración abierta, lo que facilita la interacción con determinadas proteínas: cuanto más abierto (o menos empaquetado) está el ADN, más interacciones pueden producirse, lo que se traduce en una mayor actividad y, por tanto, una mayor expresión de los genes.

Con todo, cada una de esas nuevas herramientas ofrece solo una imagen parcial del problema. Para desentrañar las complejidades de la función celular necesitamos, pues, más capas de información. Necesitamos una visón de conjunto que integre datos procedentes de distintas técnicas. Y aquí entra en escena la secuenciación multimodal.

Y LLEGÓ LA SECUENCIACIÓN MULTIMODAL

La metodología que está revolucionando la biología celular y que centra este artículo corresponde precisamente a la aplicación combinada, en células individuales, de distintas técnicas de secuenciación. Los «métodos ómicos multimodales» tienen el potencial de informarnos sobre el modo en que interactúan los distintos mecanismos de regulación.

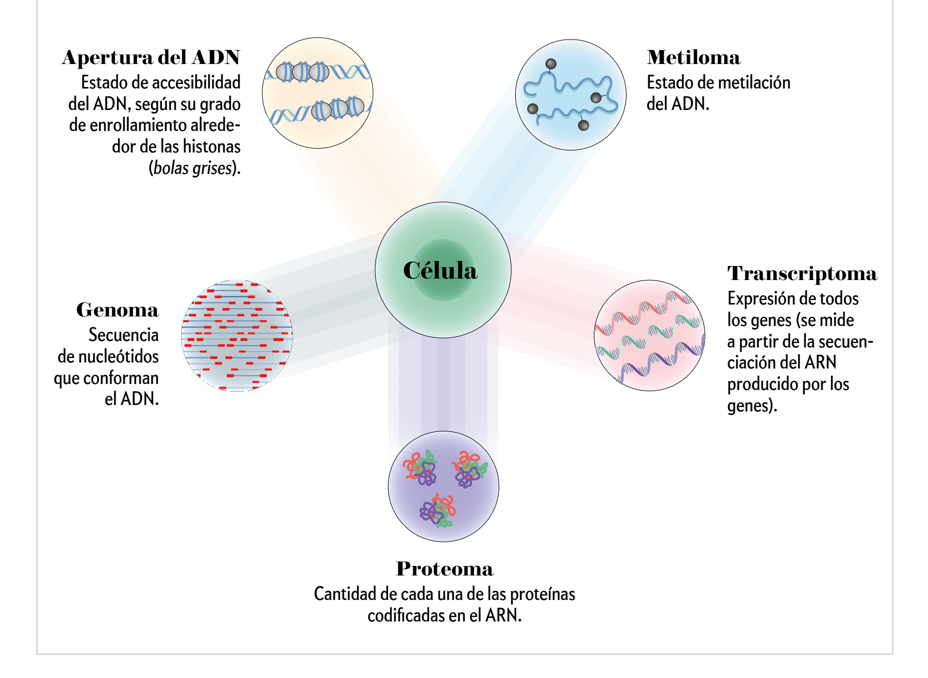
Estas técnicas se están aplicando al estudio del desarrollo embrionario y también a otros campos de gran relevancia como

¿EN QUÉ CONSISTE?

Más que la suma de las partes

A lo largo del último decenio se han desarrollado numerosas técnicas de secuenciación de células individuales que han permitido medir el genoma, el epigenoma, el transcriptoma y el proteoma de células individuales. Ello respondía a la necesidad de mejorar el estudio de sistemas con una gran heterogeneidad celular, en los que el análisis «a bulto» de los tejidos resulta insuficiente. Sin embargo, pese a tratarse de un gran avance, este enfoque unicelular se queda corto cuando se aplica al estudio de procesos de gran complejidad como, por ejemplo, el desarrollo embrionario. Y es que la información que arroja cada una de estas técnicas unicelulares es, aunque muy valiosa, parcial.

Así que los científicos han dado un paso más y han adoptado un enfoque múltiple, multimodal, que combina varias de estas medidas de células individuales. Esta superposición de capas de información permite obtener una visión más rica y completa de los fenómenos celulares. Las combinaciones de medidas más habituales son: genoma + transcriptoma, proteoma + transcriptoma, metiloma + transcriptoma, apertura del ADN + transcriptoma, metiloma + apertura del ADN + transcriptoma. La nueva metodología se denomina «secuenciación multimodal de células individuales» y está resultando tan revolucionaria que ha sido declarada método del año 2019.



el cáncer. Los tumores entrañan una elevada heterogeneidad celular [*véase* «Heterogeneidad intratumoral», por Ignacio Varela; Investigación y Ciencia, octubre de 2014]; por tanto, para entender cómo el tumor crece y cuáles son las células que responden al tratamiento reviste una gran importancia medir todos los tipos celulares presentes. Asimismo, en el estudio del cáncer también es especialmente relevante combinar la medida del genoma con la del transcriptoma, para conocer las consecuencias de las distintas mutaciones que se acumulan en el tumor. La secuenciación multimodal también se está usando para arrojar luz sobre otros procesos básicos en biomedicina, como los cambios que acontecen en una célula madre sanguínea para dar lugar a todos los tipos de célula de la sangre.

PRIMEROS ESTUDIOS MULTIMODALES

El primer estudio que combinó información sobre el metiloma, la accesibilidad del ADN y el transcriptoma en una misma célula se centró precisamente en el desarrollo embrionario en ratones. Lo publicaron en *Nature* a finales de 2019 Wolf Reik, del Instituto Babraham, Ricard Argelaguet, del Instituto Europeo de Bioinformática (perteneciente al Laboratorio Europeo de Biología Molecular) en Cambridge, y otros colaboradores. Para la investigación se utilizaron 1105 células provenientes de 4 estadios distintos del desarrollo embrionario. Los autores observaron que el grado de metilación y la apertura del ADN en el promotor de los genes afectaban poco a la expresión genética: solo el 2,5 por ciento de los genes mostraba una correlación entre el estado de metilación del promotor y la expresión; y solo el 1 por ciento de ellos mostraban correlación entre la apertura del ADN y la expresión.

A continuación, los autores usaron la información del transcriptoma para ordenar las células en la dirección del desarrollo embrionario: de las más inmaduras (pluripotentes) a las más maduras (más diferenciadas). Ello fue posible porque en el experimento se analizaron más de mil células. Una muestra tan grande permite capturar mucha variación y observar los cambios infinitesimales de la expresión genética que tienen lugar cuando una célula pasa del estado pluripotente a uno de diferenciado (en este caso, los tres tipos celulares que se encuentran en el embrión diferenciado corresponden al ectodermo, el mesodermo y el endodermo).

Mediante la superposición del epigenoma y el transcriptoma de las mismas células, los autores descifraron el modo en que las modificaciones epigenéticas se coordinan con los cambios de la expresión genética. Observaron que los reguladores de la expresión se encuentran lejos de los genes, en los llamados potenciadores (*enhancers*, secuencias de ADN a las que se unen activadores y otros factores que aumentan la transcripción de un gen). Son los cambios en la metilación y la accesibilidad de estos elementos los que afectan más a la expresión de los genes.

Finalmente, también se observó que, para el ectodermo, el epigenoma de los elementos reguladores se establece ya en la célula pluripotente, mucho antes del cambio en la expresión genética. Ello muestra que, en algunos casos, los cambios epigenéticos son muy anteriores a los de la expresión. Estos descubrimientos son fundamentales para entender qué «decisiones» toman las células, y cuándo, para cambiar de identidad.

Otros experimentos similares han analizado también con gran precisión la relación entre los cambios en la apertura del ADN y las modificaciones en la expresión de los genes en sistemas dinámicos. En uno de los primeros estudios, publicado en *Science* en 2018, Junyue Cao, de la Universidad de Washington, y sus colaboradores secuenciaron 4825 células para conocer el transcriptoma y la apertura del ADN durante la respuesta celular al tratamiento con cortisol (los autores usaron dexametasona, un simulador sintético del cortisol). Se analizaron las células en el momento de aplicación del fármaco y una y tres horas después. Ello permitió ordenarlas según el grado de respuesta al fármaco y estudiar la coordinación entre la apertura del ADN y la expresión genética. Este trabajo pionero nos muestra la utilidad de los análisis «ómicos» multimodales para el desarrollo de fármacos y para avanzar en el campo de la medicina personalizada.

UN SINFÍN DE POSIBILIDADES

Además de arrojar luz sobre los intrincados mecanismos de la epigenética, la secuenciación multimodal de células individuales está ayudando a desentrañar muchos otros secretos celulares. Las técnicas son tan numerosas y el abanico de combinaciones posibles es tan amplio que los nuevos caminos por explorar son casi infinitos. En un esfuerzo global, muchos de los laboratorios que están desarrollando estas nuevas metodologías también participan en el Atlas Celular Humano, un consorcio internacional que pretende elaborar una completa guía de campo para la clasificación de los tipos celulares en base a sus características moleculares [*véase* «Cartografiar cada célula», por Sang Yup Lee en «Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento»; Investigación y Ciencia, febrero de 2018].

Entre las numerosas investigaciones que se están llevando a cabo destacan las que tratan de comprender la heterogeneidad funcional de los tejidos. Thierry Voet, del Instituto Wellcome Sanger y la Universidad de Lovaina, y sus colaboradores han desarrollado un método que combina el genoma con el transcriptoma. Permite estudiar el modo en que la aparición de mutaciones afecta al transcriptoma de forma distinta en determinados tipos y estados celulares. Por otra parte, Rahul Satija, Peter Smibert y otros investigadores del Centro para el Genoma de Nueva York han desarrollado otro método que combina el transcriptoma con el proteoma; permite medir el transcriptoma más una colección de proteínas de la superficie de cada célula. Se está aplicando, por ejemplo, al estudio de las bases genéticas de la leucemia. El grupo de Soumya Raychaudhuri, de la Escuela de Medicina de Harvard, lo ha usado para estudiar los diferentes subtipos inmunitarios. Ello les ha permitido ir más allá de la clasificación típica a partir de los anticuerpos (el criterio habitual) y descubrir nuevas subpoblaciones de células.

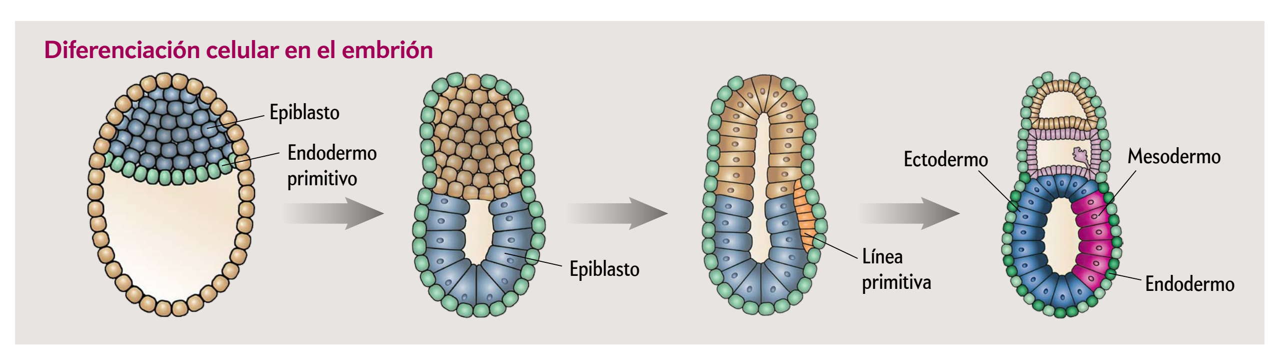
Otro de los enfoques multimodales más prometedores es el que combina la secuenciación de células individuales con la técnica CRISPR. Mediante el sistema CRISPR-Cas9 se pueden generar mutaciones en lugares determinados del genoma, que luego se leen en cada célula individual, junto con el transcriptoma. Mediante esta técnica, el grupo de Jay Shendure, de la Universidad de Washington en Seattle, estudió la respuesta del transcriptoma a diferentes mutaciones en los potenciadores de distintos genes. La inducción de mutaciones se usa también en el rastreo de linajes celulares, ya que el espectro de mutaciones inducidas en cada célula es heredado a través de las divisiones celulares. La superposición del genoma (las mutaciones) y el transcriptoma permite saber, para cada célula, de qué tipo es (qué genes expresa) y de dónde viene (a través del análisis filogenético de las mutaciones que contiene). El grupo de Jan-Philipp Junker, del Centro Max Delbrück de Medicina Molecular en Berlín, ha utilizado este método para determinar el tipo celular y el origen de las células de un pez cebra. Para ello indujeron en cada una de las células del embrión un es-

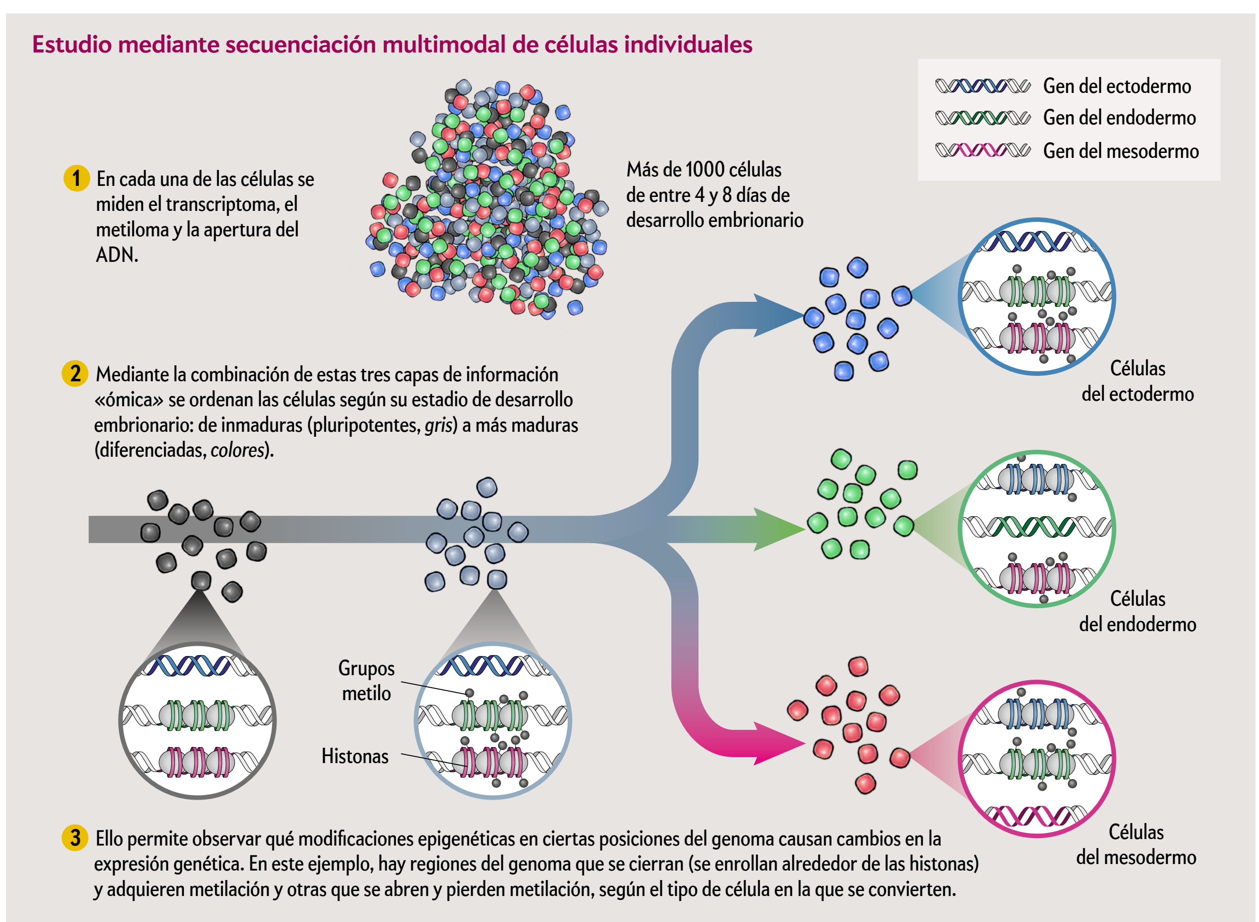
Secretos del desarrollo embrionario

La diferenciación celular que se produce durante el desarrollo embrionario constituye uno de los procesos más importantes, y a la vez más desconocidos, de la biología. ¿Cómo logran las células pluripotentes diferenciarse en los tipos celulares que luego dan lugar a tejidos tan variados como los que forman el corazón, los huesos o los pulmones? ¿Qué «decisiones» toman las células, y cuándo, para cambiar de identidad? ¿Cómo se coordinan las señales epigenéticas con la expresión de los genes?

Uno de los primeros estudios que ha utilizado la secuenciación multimodal de células individuales se ha centrado precisamente en ahondar en este tipo de cuestiones. Los investigadores se propusieron desentrañar los mecanismos que orquestan las primeras fases del desarrollo embrionario de los ratones, en concreto, los que permiten que el epiblasto forme la línea primitiva y luego esta genere el endodermo, el ectodermo y el mesodermo (*arriba*).

Para ello midieron el metiloma, la accesibilidad del ADN y el transcriptoma en más de 1000 células de entre 4 y 8 días de desarrollo. La combinación de estas tres capas de información les permitió descubrir que, para el ectodermo, el epigenoma se establece ya en la célula pluripotente (*abajo, aparición de tonos azulados*), mucho antes del cambio en la expresión genética. Es decir, que los cambios epigenéticos son muy anteriores a los de la expresión.





MULTI-OMICS PROFILING OF MOUSE GASTRULATION AT SINGLE-CELL RESOLUTION. RICARD ARGELAGUET ET AL. EN *NATURE*, VOL. 576, PÁGS. 487–491, DICIEMBRE DE 2019 (*fases del embrión y detalles de las células*)

pectro distinto de mutaciones, que luego fueron recuperadas en las células del pez adulto. Ello les ha permitido estudiar si las células de un mismo órgano siguen trayectorias similares durante el desarrollo del organismo.

Hasta aquí hemos visto algunas de las primeras aplicaciones de la secuenciación multimodal de células individuales. Constituyen los primeros pasos de un nuevo camino que posiblemente cosechará descubrimientos biológicos y biomédicos de gran relevancia. Sin embargo, este nuevo enfoque metodológico no está exento de desafíos, tanto experimentales como computacionales.

RETOS EXPERIMENTALES

El principal problema experimental de esta nueva estrategia estriba en poder medir la información de una única célula, que contiene solo picogramos de material genético (un picogramo corresponde a una billonésima parte de un gramo). Pensemos que, antes de la aparición de los métodos de secuenciación de células individuales, para medir un epigenoma o un transcriptoma se necesitaban entre 0,5 y 5 microgramos de material, es decir, un millón de veces más de lo que contiene una célula.

Para poder miniaturizar todas las reacciones y obtener el transcriptoma o el epigenoma a partir de estas pequeñas cantidades de material, se han desarrollado protocolos muy complejos. Pero analizar al mismo tiempo distintos niveles de regulación en una misma célula es más difícil todavía, ya que requiere el desarrollo de métodos que combinen estos distintos protocolos. En algunos casos, los procedimientos experimentales son tan incompatibles entre sí que la única solución es separar el contenido de la célula: el ADN por un lado y el ARN por otro. Una vez separados (y habiendo registrado cuidadosamente qué ADN y qué ARN provienen de la misma célula), se mide el transcriptoma a partir del ARN, y el genoma, la metilación o la accesibilidad, a partir del ADN. El tener que separar físicamente el ARN y el ADN de cada célula complica mucho los experimentos; los procedimientos son tan laboriosos que no puede procesarse un gran número de células (unos miles como mucho).

En otros casos, se ha conseguido adaptar dos protocolos para poder llevarlos a cabo de forma conjunta. Ello permite medir distintas características a la vez, en un único tubo, sin tener que separar físicamente el ADN del ARN, con lo que pueden examinarse muchas más muestras (células únicas). Se utilizan, por ejemplo, sistemas microfluídicos, donde cada gota contiene una célula y todas las reacciones necesarias para el análisis se producen en el interior de la gota. Con todo, la combinación de protocolos suele ser una solución de compromiso: no puede escogerse el mejor protocolo para cada tipo de medida, sino el que permite combinarse con otros. El resultado es que se obtienen datos de menor calidad que cuando se separan el ADN y el ARN y se realizan las medidas de forma separada.

Finalmente, otra opción consiste en estudiar los diferentes niveles de regulación en distintas células de una misma muestra, y no en la misma célula. Ello permite analizar muchísimas más células para cada tipo de medida sin sacrificar la calidad. El problema en este caso es que, puesto que las medidas no se realizan en la misma célula, es necesario utilizar complejos algoritmos que permitan asignar qué transcriptoma, qué epigenoma o qué genoma corresponden al mismo tipo celular.

RETOS COMPUTACIONALES

El análisis de datos «unicelulares» entraña una gran complejidad también en el plano computacional. Con la combinación de medidas de tan alta resolución para millares de células, la cantidad de datos generados es enorme (macrodatos). Por esta razón, los algoritmos clásicos tienen que modificarse para que puedan operar a escalas mayores. Además —aunque resulte paradójico—, las medidas para cada célula son incompletas: al trabajar con cantidades de ADN y ARN tan pequeñas, experimentalmente es difícil recuperar toda la información, ya que siempre hay un elevado porcentaje del genoma y del transcriptoma que, simplemente, se pierde durante el proceso y que, por tanto, no se mide.

Nos hallamos, pues, ante un escenario donde se analizan millares y millares de células únicas, pero en el que para cada una se mide solo un porcentaje muy pequeño de toda la información. La parte perdida del genoma, epigenoma y transcriptoma es distinta para cada célula. La clave, desde el punto de vista computacional, es poder reconstruir el conjunto entero (ya sea el embrión, el tumor o el proceso de diferenciación de un órgano o tejido) a partir de muchas células individuales, pero con ciertas lagunas de datos perdidos para cada una de ellas. Reconstruir sistemas de regulación (como, por ejemplo, extraer correlaciones entre la metilación del ADN y la expresión de los genes) es más difícil todavía, ya que puede ser que para algunos genes se mida el nivel de expresión pero no el nivel de metilación, o viceversa. En mi grupo de investigación nos dedicamos precisamente a resolver este problema: desarrollamos métodos computacionales que, mediante la combinación de informacion multiómica de una gran cantidad de células, permitan entender las relaciones entre el transcriptoma y el epigenoma.

A medida que los investigadores vayan perfeccionando los protocolos experimentales y se vayan refinando los métodos para la unión e interpretación de las diferentes capas de información biológica, tendremos más herramientas para descubrir relaciones de causa y efecto en muchos de los eventos moleculares que siguen siendo una «caja negra» dentro del ecosistema celular. En conclusión, los métodos multiómicos abren la posibilidad de estudiar procesos sumamente complejos en la escala más pequeña posible: una sola célula. Más allá de los desafíos que aún plantea, su potencial es enorme para revolucionar la biología y la biomedicina. IyC

PARA SABER MÁS

Single-cell methylome landscapes of mouse embryonic stem cells and early embryos analyzed using reduced representation bisulfite sequencing. Hongshan Guo et al. en *Genome Research*, vol. 23, págs. 2126-2135, diciembre de 2013.
Joint profiling of chromatin accessibility and gene expression in thousands of single cells. Junyue Cao et al. en *Science*, vol. 361, n.º 6409, págs. 1380-1385, septiembre de 2018.
Multi-omics profiling of mouse gastrulation at single-cell resolution. Ricard Argelaguet et al. en *Nature*, vol. 576, págs. 487-491, diciembre de 2019.
The secret life of cells. Michael Eisenstein en «Method of the year 2019: Single-cell multimodal omics». Informe especial publicado en *Nature Methods*, vol. 17, enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Secuenciación de células individuales. Kelly Rae Chi en *IyC*, abril de 2014.
La epigenética, moduladora clave de la evolución. Entrevista con Edith Heard y Vincent Colot. Marie-Neige Cordonnier en *IyC*, enero de 2020.

por María Montseny, Andrea Gori, Josep-Maria Gili

El método bádminton

Inspirado en la pesca artesanal, este método sencillo e innovador facilita la restauración de los fondos marinos continentales

En las últimas décadas, los fondos marinos de la plataforma continental se han degradado y empobrecido debido al impacto de la pesca y otras actividades humanas. Una de las consecuencias más destacadas de esta alteración ha sido la destrucción de los hábitats bentónicos. En estos, numerosas especies sésiles (gorgonias, corales y esponjas, entre otras) configuran estructuras tridimensionales que son esenciales para que entre sus colonias vivan muchas otras especies, algunas de ellas de interés comercial. Estas especies bentónicas «constructoras» constituyen el refugio temporal de estadios larvarios y juveniles de peces y crustáceos, que encuentran entre sus colonias alimento y protección. La desaparición de estos organismos supone una pérdida de biodiversidad y de su función ecológica, esencial para la supervivencia de las especies asociadas. Asimismo, la fragilidad, longevidad, crecimiento lento y reclutamiento reducido, característicos de corales y gorgonias, dificultan su recuperación.

La restauración de los hábitats bentónicos es, pues, urgente. Las estrategias de restauración pasiva (conservación y protección) ya no bastan para contrarrestar los efectos de la actividad humana. Necesitamos una restauración activa. Desde hace unos años se ha empezado a aplicar el trasplante de colonias de animales sésiles en zonas litorales accesibles con técnicas de escafandra autónoma, sobretodo en ambientes tropicales [*véase* «¿Es posible salvar los corales?», por Rebecca Albright; Investigación y Ciencia, marzo de 2019]. Pero en las zonas más profundas, a 60 metros y más, el trasplante es difícil, a la vez que muy costoso, debido a que solo puede accederse a ellas mediante robots submarinos.

A partir de la observación de los pescadores artesanales de la isla de Menorca, hemos desarrollado un método de restauración activa para los fondos de gorgonias de la plataforma continental (en el marco de los proyectos de investigación MITICAP y RESCAP del Programa PLEAMAR de la Unión Europea). Los pescadores de Menorca limpian in situ sus redes de pesca y devuelven al mar las colonias de gorgonias que han pescado accidentalmente. Adheridas a una base de rodolitos (algas





calcáreas), caen y se depositan, de pie, en el fondo. Inspirándonos en esta práctica, hemos desarrollado un método similar: las gorgonias atrapadas por los pescadores **1** se extraen de las redes y se trasladan a unos acuarios en las cofradías para que se recuperen **2**; luego se adhieren a un sustrato rocoso que las mantiene erectas **3** (no pueden sobrevivir tumbadas); por fin, los trasplantes de gorgonias se devuelven a su hábitat natural, la plataforma continental, lanzándolos al mar directamente desde las embarcaciones **4**.

Pese a su sencillez, esta técnica ha demostrado ser muy eficaz: más del 80 por ciento de colonias sobreviven un año después de ser trasplantadas y devueltas al fondo marino. Ello permitirá abarcar un gran número de gorgonias, lo que facilitará el restablecimiento de los bosques de gorgonias, acelerando la recuperación global de los fondos. Si, además, implicamos a los pescadores locales, el proceso es todavía más eficiente.

—María Montseny, Andrea Gori y Josep-Maria Gili, Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, del CSIC, en colaboración con la Fundación Biodiversidad y el Parque Natural del cabo de Creus

IMÁGENES DEL ICM-CSIC

por Lino Camprubí



Lino Camprubí, filósofo y doctor en historia de la ciencia por la Universidad de California en Los Ángeles, es investigador Ramón y Cajal en la Universidad de Sevilla. Es uno de los editores de *La sociedad entre pandemias* (Fundación Gaspar Casal, 2021).

Pensar la epidemiología en tiempos de COVID-19

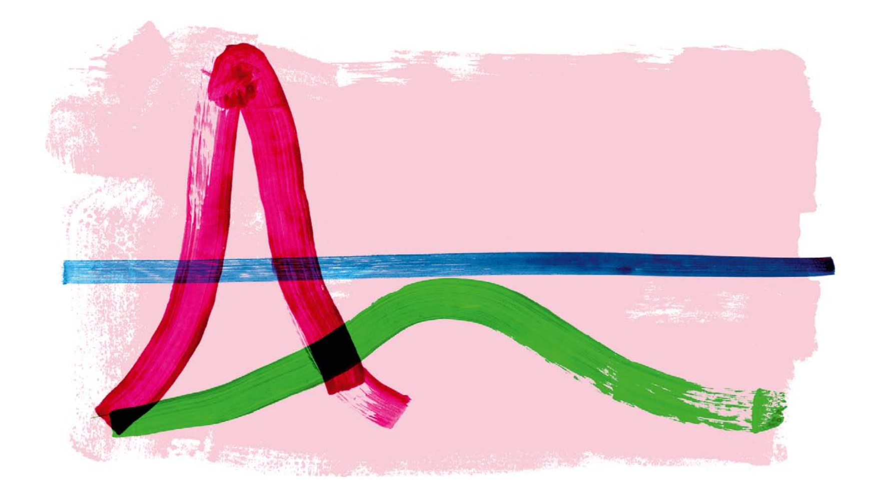
Los debates generados por esta disciplina, a caballo entre la ciencia y la política pública, han influido en las distintas respuestas de los Gobiernos ante la pandemia

En su comedia teatral de 1923 *El doctor Knock, o el triunfo de la medicina*, Jules Romains describe el modo en que los ciudadanos de una villa se «elevan a la existencia médica» al seguir las instrucciones de un joven y ambicioso doctor que, como el gran médico experimental y teórico Claude Bernard, estaba persuadido de que una persona sana no era más que un enfermo mal diagnosticado. La higiene debía gobernar la vida de las ciudades y el progreso podía medirse por la reglamentación médica de los hábitos y horarios de los ciudadanos, que trataban de resistirse inútilmente ante semejante invasión de su vida y costumbres.

Pero ni Bernard ni Knock se habrían atrevido a soñar con un protagonismo para la epidemiología como el que ha adquirido en los últimos meses debido a la irrupción del nuevo coronavirus SARS-CoV-2. Se estima que más de un 40 por ciento de la población mundial ha estado sujeta a algún tipo de confinamiento. Hemos asistido a la cancelación masiva de vuelos entre países y al cierre de fronteras, incluidas las europeas aparentemente superadas con el Acuerdo Schengen de 1995. No es exagerado decir que las restricciones de la movilidad han transformado un mundo que creíamos irreversiblemente globalizado. Ante el diagnóstico de pandemia, las economías se han visto obligadas a guardar reposo por imperativo médico.

¿Qué papel desempeña la epidemiología en la gestión de esta crisis? El presupuesto del que a menudo se parte es que solo los epidemiólogos pueden juzgar sobre políticas públicas dirigidas a frenar la expansión de enfermedades contagiosas. Pero la realidad es que algunos dirigentes, a veces llamados negacionistas por su rechazo a las medidas más restrictivas, han optado por la alternativa contraria: han cuestionado tanto a los científicos como a las autoridades sanitarias.

Estas controversias públicas se han alimentado de los debates internos en la propia epidemiología y en el ámbito de la salud pública. Aunque poco a poco van estableciéndose respuestas firmes a la luz de los datos, las publicaciones científicas se han visto desbordadas por incertidumbres, contradicciones y competencia entre interpretaciones diversas. Los datos mismos han traicionando su etimología y en vez de dados han sido hechos, rehechos y contrahechos —además de interpretados y reinterpretados—. La pregunta se plantea sola: ¿Qué es la epidemiología y cuál es su relación con la sociedad?



GETTY IMAGES/SLOOP COMMUNICATIONS/ISTOCK

Epidemiología y sociedad

La epidemiología puede definirse como la ciencia biosocial de las enfermedades. La medicina en su sentido más clásico se dedica al cuidado del cuerpo individual, sosteniendo en el límite que no hay enfermedades sino enfermos. La microbiología médica estudia los efectos de los patógenos víricos y bacterianos en la estructura biomolecular de esos cuerpos individuales (tanto humanos como de otros animales, a diferencia de la medicina).

En contraste con esa escala micro, la epidemiología se mueve en la escala macro: como medicina social o comunitaria, se interesa por las enfermedades y su expansión más que por los enfermos concretos o las células que componen su cuerpo. Su campo prioritario son las poblaciones, agrupadas según las respectivas probabilidades de contraer ciertas enfermedades (contagiosas o no). Sus métodos, por tanto, son la encuesta, la estadística y la modelización. Por último, su orientación y estructura epistemológica son eminentemente prácticas. Y la efectividad de esta práctica se basa tanto en la capacidad de prevención y detección de epidemias como en la fluidez de la relación de los epidemiólogos con los sistemas sanitarios y políticos.

Hay, por tanto, dos niveles de relación entre la epidemiología y la sociedad: el de

la generación de conocimiento epidemiológico y el de su transmisión a los decisores políticos y la opinión pública. La historia y la sociología de la ciencia nos han enseñado que estos niveles son, en realidad, inseparables. Por un lado, la esfera política marca ciertas pautas y prioridades a los científicos. Por otro, la práctica diaria de estos incluye labores de comunicación con colegas, miembros de disciplinas afines, sistemas de financiación, responsables políticos y medios de comunicación. Los debates que se han generado en ambos niveles de relación han sido muy relevantes en la variedad de respuestas políticas de los diferentes países.

Certezas e incertidumbres

Las epidemias han diezmado a las poblaciones humanas al menos desde que estas se hicieron ganaderas y agrícolas, ya que muchos patógenos proceden de animales y proliferan en núcleos sedentarios y densamente poblados. Los nichos ecológicos de los patógenos se expandieron en igual medida que los intercambios entre sociedades, hasta alcanzar la magnitud mundial de las pandemias. Sin embargo, a lo largo de los siglos y milenios, las enfermedades contagiosas se consideraron a menudo influencias astrológicas, divinas o atmosféricas. La proto-epidemiología trataba de combatir esos advenimientos mediante recomendaciones de higiene (física y moral).

El desarrollo de la microbiología en la segunda mitad del siglo xix comenzó a diferenciar enfermedades atendiendo a sus agentes específicos. No es de extrañar que los primeros pasos de la epidemiología moderna se decantaran hacia la causalidad determinista que identificaba la enfermedad con la presencia y acción del patógeno. En la década de 1930, en pleno auge de esta perspectiva determinista, el bacteriólogo y fenomenólogo Ludwig Fleck entraba de lleno en el debate filosófico, uniéndose a quienes denunciaban las debilidades del reduccionismo microbiológico (por ejemplo, la existencia de enfermos asintomáticos deshacía la ecuación entre patógeno y enfermedad).

A lo largo de la segunda mitad del siglo xx se fueron añadiendo causas concomitantes y, sobre todo, se consolidaron las metodologías matemáticas posibilitadas por el desarrollo de la demografía, la sociología y la estadística del siglo xix en adelante. Por un lado, se perfeccionaron los modelos capaces de representar la expansión de enfermedades en determinadas poblaciones (la ulterior adición de las simulaciones por ordenador permite jugar con diferentes escenarios, incluyendo variables como el comportamiento o la edad de los potenciales contagiados). Por otro, se refinaron los métodos estadísticos que hacían posible la epidemiología experimental, y no solo observacional.

La epidemiología ha ido incorporando contenidos procedentes de la sociología, la demografía, la economía y otras ciencias humanas a la hora de establecer factores de riesgo (nivel de ingresos, horas de consumo de Internet, tipo de Gobierno, hábitos de higiene, interacción social, ejercicio, etcétera). Asimismo, combina constantemente metodologías propias de las ciencias humanas con metodologías propias de las ciencias naturales. De esta dualidad provienen parte de las incertidumbres. Los debates generados en torno a la COVID-19 ofrecen un buen ejemplo.

En mayo de 2020 se produjo una interesante discusión en las páginas del *Boston Review*. El filósofo de la Universidad de Pittsburgh Jonathan Fuller se hacía eco de las prevenciones de Nancy Cartwright, de la Universidad de Durham, y otros ante la práctica de extrapolar resultados obtenidos en un contexto determinado a otros contextos sanitaria y antropológicamente distintos. Los hábitos, la esperanza de vida, la densidad de población y otros factores limitan tanto la representatividad de los modelos predictivos como la supuesta objetividad de los ensayos clínicos aleatorizados.

El controvertido epidemiólogo de Stanford John Ioannidis, por su parte, señalaba en esa misma discusión que los modelos no estarían preparados para guiar políticas públicas hasta que no incluyeran datos contrastados sobre las enfermedades y mortalidad propiciadas por las propias medidas anti-COVID19. Dado que el confinamiento total puede disparar patologías graves (por ejemplo cardiovasculares y mentales) y provocar una crisis económica de consecuencias devastadoras para la salud de millones de personas, solo ampliando el círculo de los estudios epidemiológicos se podrían evitar remedios aún más letales que la enfermedad.

Medidas de salud pública

Lo anterior ya nos pone de lleno en el debate público sobre políticas basadas en conocimiento epidemiológico. La llamada «medicina basada en datos probatorios», muy en boga en las primeras décadas del siglo xx, aspiraba a definir la práctica tanto clínica como política en base a los resultados científicos que la literatura fuera estableciendo como seguros. A pesar de avances prometedores en el tratamiento y difusión de la información disponible, esta aspiración ha demostrado exigir demasiado, tanto por parte de los científicos como de los médicos y políticos en la trinchera.

Una cruda verdad se ha ido abriendo paso en esta crisis: no hay una única manera de interpretar los resultados científicos y estos no cubren todos los campos de interés. Por tanto, no se pueden esperar de la ciencia epidemiológica dictámenes incontrovertibles y universales sobre políticas de salud pública.

Esto no es una llamada al escepticismo. Al menos desde el artículo publicado en *The Lancet* el 24 enero de 2020 por Chen Wang, de la Academia de Medicina China, y sus colaboradores, se sabía lo suficiente acerca del peligro como para que aquellos países con personal cualificado y organizado tomaran medidas. Que unos lo hicieron mejor que otros está a la vista de los resultados. Sin minusvalorar el factor suerte, quienes —al menos de momento— han logrado capear la crisis sanitaria sin producir una crisis económica aún más devastadora, lo hicieron combinando ciencia, experiencia sanitaria y prudencia política. La lección es de humildad. Como recuerda el historiador David Edgerton, del Colegio King de Londres, en nuestras sociedades hipertecnológicas el método milenario de la cuarentena ha sido el más socorrido. IyC

PARA SABER MÁS

Epidemiología moderna. Kenneth Rothman. Díaz de Santos, 1987.
The gold standard: the challenge of evidence-based medicine and standardization in health care. Stefan Timmermans y Marc Berg. Temple University Press, 2003.
Philosophy of epidemiology. New directions in the philosophy of science. Alex Broadbent. Palgrave McMillan, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La perenne enfermedad. José María Valderas Martínez en *Epidemias*, colección Temas, n.º 18, 1999.
La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena Cervellera en *IyC*, junio de 2020.

por Ronald Drimmel

Ronald Drimmel es astrónomo en el Instituto Nacional de Astrofísica de Italia.



Preservar el cielo nocturno

Miles de nuevos satélites podrían estropear una vista que ha inspirado y conectado a miles de millones de personas a lo largo de la historia

La compañía SpaceX ya ha lanzado cientos de sus satélites Starlink y prevé poner en órbita hasta 42.000 de ellos, con el objetivo de proporcionar Internet de alta velocidad a miles de millones de personas. Avanzar hacia este tipo de acceso es loable e importante, pero tiene un precio: esos primeros satélites enviados el año pasado reflejan la luz solar y brillan más que el 99 por ciento de los otros 5000 aparatos, más o menos, que giran ahora mismo alrededor de la Tierra; y sin duda habrá muchos más [*véase* «Oleada de satélites», por Mark Fischetti; Investigación y Ciencia, agosto de 2020].

Esa proliferación es perjudicial para la astronomía: la probabilidad de que un satélite Starlink atraviese el campo de visión de un telescopio y eche a perder una observación será bastante alta cerca del alba y el ocaso, cuando los objetos están más iluminados. Por este motivo, más de 1800 de mis colegas astrónomos han firmado una petición para que los Gobiernos protejan el cielo nocturno de tamaña incursión.

El impacto de esa enorme constelación artificial y otras previstas trascenderá la astronomía. La horda de satélites Starlink ya puede apreciarse a simple vista en un cielo moderadamente oscuro y, en última instancia, en torno al crepúsculo podrían verse más de 100 puntos de luz en movimiento desde cualquier lugar del planeta. Ese número es similar al de las estrellas más brillantes del firmamento, aquellas que se distinguen fácilmente y ayudan a localizar las constelaciones.

La humanidad es una mezcla de culturas surgidas en diversos lugares y con distintas historias, pero casi todas ellas poseen relatos emotivos o admonitorios inspirados en la misma bóveda celeste repleta de estrellas. ¿Estamos a punto de perder algo que nos ha unido de manera intangible, una experiencia común que ha contribuido a convertirnos en una familia humana, a cambio de una comodidad moderna?

A raíz de las protestas, SpaceX ha prometido abordar el problema de la visibilidad aplicando revestimientos experimentales (pintando los satélites de negro) o instalando parasoles para bloquear la luz del Sol, pero no ha modificado su agresivo calendario de lanzamientos. Y entre las superficies más iluminadas de los satélites están los paneles solares, justo la parte que no se puede pintar.



Por desgracia, no hay normas que regulen cómo de brillante puede ser un satélite, y mucho menos un conjunto de miles de ellos. En Estados Unidos, se ha planteado la posibilidad de llevar a los tribunales a la Comisión Federal de Comunicaciones, por su hipótesis de trabajo de que los satélites no tienen un impacto ambiental significativo. Aun así, las leyes de una nación no impiden los lanzamientos de otra: el espacio literalmente no tiene fronteras, y será preciso proteger el cielo de la iluminación orbital a nivel mundial.

La UNESCO mantiene una relación de lugares declarados patrimonio de la humanidad —emplazamientos con un valor cultural o natural único y excepcional— y está consagrada a su conservación. En algunos casos (como el desierto del Namib o el yacimiento de Risco Caído, en Gran Canaria), la vista del cielo nocturno es una de las características que hacen al paraje merecedor de tal distinción. Sin embargo, en virtud de la Convención sobre el Patrimonio Mundial, la lista de la UNESCO se circunscribe a territorios específicos, y el firmamento no está vinculado a ningún sitio en concreto. Así pues, aunque la UNESCO haya afirmado que el cielo es parte del patrimonio universal de la humanidad, parece que la misma cualidad que lo hace importante para todos nosotros también nos impide preservarlo. Dadas las repercusiones planetarias, esperemos que la ONU encuentre alguna manera de salvaguardar el cielo.

Hasta ahora, el cielo oscuro no necesitaba protección. Más allá de nuestro alcance, constituía una ventana diáfana al universo, una extensión inabarcable e inalterable. La extraordinaria belleza de un cielo lleno de estrellas nos recuerda (igual que hizo con nuestros antepasados) que nosotros y nuestros problemas somos pequeños y que, tal vez, parte de lo que nos hace humanos reside en nuestra capacidad de reconocer y admirar el prodigio de un universo más grande que nosotros pero del que formamos parte. El uso del espacio como recurso común, en particular por los operadores de satélites, no debería destruir nuestra única ventana al cosmos.

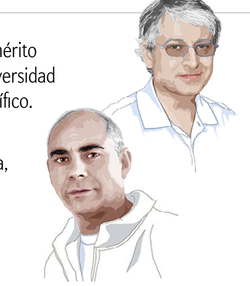
Durante mi infancia en Montana, jugábamos a ver quién era el primero que encontraba un satélite desplazándose entre el manto de estrellas del cielo nocturno. De aquí a poco, el juego podría consistir en identificar las constelaciones tras un enjambre de puntos de luz en movimiento. La astronomía sobrevivirá; me preocupa mucho más que estemos a punto de perder justo aquello que me llevó a convertirme en astrónomo.

MARTIN GRE

por Pere Castells y Claudi Mans

Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química de la Universidad de Barcelona y divulgador científico.

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es presidente del congreso mundial Science&Cooking.



Las salmueras en la cocina actual

Su uso antes de las cocciones ofrece ventajas culinarias, gastronómicas y dietéticas

La sal común (cloruro de sodio) es uno de los productos culinarios de mayor pureza. Existen diferentes variantes, según su modo de obtención y uso. Tenemos las sales de roca o sales minerales como la sal negra (de color gris, que contiene compuestos sulfurosos que le dan un sabor característico) o la sal rosa del Himalaya (con óxidos de hierro y manganeso). En otro grupo están las sales de salinas como la sal fina, que es la más utilizada, o la sal gruesa, empleada en cocciones «a la sal» y procesos de curación. También se obtienen de las salinas la flor de sal (cristales laminares que flotan en el agua), la sal Maldon (con morfología de escamas), la sal de Guérande (muy rica en oligoelementos), la sal negra de Hawái (con lava negra) o la sal roja de Hawái (con arcillas volcánicas). Existen incluso sales sintéticas (como la Soda-lo®), microesferas de disolución muy rápida que confieren un intenso sabor salado; se utilizan en la cocina para hipertensos.

El uso culinario de la sal se remonta a unos cinco mil años, cuando comenzó a emplearse la salazón para conservar pescados, carnes, verduras o setas. Más recientes son las técnicas de cocción «a la sal». Y ahora se ha encontrado una nueva aplicación que está revolucionando el mundo de las texturas de las carnes y los pescados: los baños en salmuera previos a la cocción.

La presencia de sal en el agua aumenta la interacción entre las proteínas y el líquido que las rodea; ello provoca la incorporación de más agua a la red proteínica o una mayor solubilidad de las proteínas, en ciertos casos. Este fenómeno es proporcional a la concentración de sal y se conoce como solubilización salina (*salting in*). Al llegar a una concentración de sal elevada, se da el proceso contrario: las interacciones entre proteínas son mayores y el agua incorporada sale de la estructura. Se denomina precipitación salina (*salting out*).

Los baños con salmuera previos a la cocción ofrecen, pues, varias ventajas, sobre todo para los cocineros profesionales. Permiten salar de forma regular —ello evita tener que añadir sal durante la cocción, lo cual siempre es una decisión subjetiva del cocinero, que acostumbra a salar en demasía—. Facilitan el servicio (porque no hay que salar el plato). Reblandecen la textura. Mejoran el aspecto de algunos productos, como las carnes rojas. Y hacen que la elaboración del plato sea más reproducible. Asimismo, permiten reducir el contenido de sal en las elaboraciones para hospitales, geriátricos, restaurantes o nuestra propia casa. Una herramienta más para lograr una dieta más saludable.



GETTY IMAGES/4KODIAK/ISTOCK

En 2016, Victor Quintillà, del restaurante Lluerna cerca de Barcelona, junto con investigadores del Campus de la Alimentación de la Universidad de Barcelona, llevaron a cabo un estudio con el propósito de analizar los efectos de esta técnica en la cocción del pollo (pechuga) y la caballa. Los resultados se dieron a conocer en el marco del Fórum Gastronómico de Barcelona. Observaron que la inmersión en salmuera aumentaba la masa de los alimentos y que estos perdían menos líquido (por tanto, se conservaban mejor) antes de la cocción. Se consiguió, además, una textura más blanda. Concluyeron que las mejores concentraciones de salmuera para incorporar agua mediante solubilización salina estarían (para pollo y caballa) entre un 7 y un 10 por ciento. En cuanto a los tiempos de baño recomendados: 20 minutos para la pechuga de pollo; 50 minutos para el cochinillo; 2,5 horas para la carne magra de ternera; 8 minutos para la lubina, el rape y la merluza; 7 minutos para los langostinos, y solo 1 minuto para los calamares.

Joan Roca, de El Celler de Can Roca, propone baños al 10 por ciento de sal en agua durante 1 hora para carrillera de cerdo y pechuga de pollo; 15 minutos para entrecot de ternera; 15 minutos para lubina, merluza, salmón o lenguado entero, y 5 minutos para sardina. El chef británico Josh Eggleton utiliza salmueras con romero, piel de limón, clavo y otros aromatizantes. Y Salvador Brugués, experto en cocina a baja temperatura, usa baños de sal poco concentrados (entre un 2 y un 3 por ciento) durante 24 horas, 48 horas o incluso una semana, según el producto. También impregna la salmuera aplicando el vacío, con lo que simula procesos industriales ya existentes.

Este nuevo uso de las salmueras está llegando también a los hogares. Así lo muestran las redes sociales, donde podemos encontrar recetas como esta: sumergir un pollo entero en agua con sal al 10 por ciento durante 12 horas y después cocerlo al horno hasta dorarlo. Según los comentarios, se consiguen texturas y sabores espectaculares. IyC

EN NUESTRO ARCHIVO

Las salmueras. Salvador Ordóñez en *IyC*, enero de 1984.



***TULLBERGIA*, más pequeño que una cabeza de alfiler, emplea sus antenas carnosas y sus seis patas para vagar entre los glaciares y los suelos tóxicos de la Antártida.**

BIOLOGÍA

Los secretos un superviviente antártico

Un minúsculo hexápodo ha sobrevivido a una treintena de glaciaciones en los confines de la Antártida. Ahora se comienzan a desvelar las claves de semejante tenacidad

Douglas Fox

Fotografías de Igor Siwanowicz



Douglas Fox escribe acerca de ciencia polar, clima y biología. Es colaborador de *New Scientist, Discover* y *Christian Science Monitor*, entre otras publicaciones, y ha recibido numerosos premios, como el de la Sociedad Americana de Periodistas y Autores.



En un soleado día de enero de 2018, un helicóptero sobrevolaba las vertientes rocosas de la cordillera Transantártica, una cadena de cumbres que se alza sobre el vasto casquete de hielo. A bordo, Ian Hogg y Byron Adams dirigían su mirada escrutadora a los promontorios y salientes sin nieve situados bajo sus pies, a solo 600 kilómetros del polo sur. Buscaban hitos del relieve que encajaran con la descripción de una sucinta nota dejada en 1964 por un entomólogo ya fallecido, en la que relataba el descubrimiento de un enigmático animalillo en aquel paraje desolado. Nadie lo había vuelto a ver desde entonces.

Como una auténtica divisoria, la cordillera recorre más de 3000 kilómetros del continente helado, desde la costa norte hacia el interior, en dirección al sur. De 100 a 200 kilómetros de ancho, actúa como una barrera que frena el vasto casquete de la Antártida Oriental, una colosal masa de hielo que se alza 3000 metros sobre el nivel del mar. Glaciares alimentados por ese casquete se escurren entre los picos montañosos y fluyen lentamente hacia la Antártida Occidental, situada a menos altura. Los fuertes vientos secos que azotan la meseta oriental mantienen sin hielo los picos.

En invierno, las temperaturas en el sur de la cordillera se desploman por debajo de los –40 ºC. Algunos de los suelos precarios y yermos que cubren las cimas no han recibido cantidades apreciables de agua en milenios, por lo que en ellos se han ido acumulando sales cáusticas, a semejanza de lo que sucede en la superficie de Marte. Pero a pesar de la extrema dureza del entorno, las montañas acogen un puñado de seres diminutos. En su afán por saber qué especies moran allí, Hogg, biólogo de Polar Knowledge Canada (organismo científico canadiense) y Adams, biólogo de la Universidad Brigham Young, en Utah, habían ido recolectando muestras desde 2006. Pero la especie descubierta en 1964, *Tullbergia mediantarctica,* les había dado esquinazo hasta el momento.

El lugar que estaban peinando ahora, el monte Speed, era una cima baja del sur de la cordillera, situada unos 700 kilómetros tierra adentro. Aquí el glaciar Shackleton discurre de este a oeste a través de una brecha abierta en las montañas de 10 kilómetros de ancho. Hogg divisó un promontorio similar al descrito en las notas del entomólogo. El piloto tomó tierra en él y los pasajeros bajaron a una ladera de roca desnuda, salpicada de bloques dispersos de granito amarillento. Comenzaron a buscar metódicamente bajo las piedras, una a una. En cuestión de minutos hallaron lo que buscaban: decenas de animalillos de seis patas, blanquecinos, más menudos que una cabeza de alfiler.

Caminaban lenta pero resueltamente entre los granos de arena, palpando con sus antenas, blandas y carnosas como dos



1

dedos larguiruchos. Vulnerables en extremo a la deshidratación, bastaba con un minuto de exposición al aire seco para que comenzaran a encogerse y a morir. Durante las jornadas siguientes los hallaron bajo las piedras de otras cuatro laderas, a lo largo del extremo inferior del glaciar Shackleton. En ocasiones el oasis que ocupaban no era más grande que una cancha de baloncesto.

Tullbergia pertenece al orden de los colémbolos, artrópodos primitivos, parientes de los insectos y carentes de alas. Pocos han oído hablar de ellos, aunque en el suelo de su jardín probablemente abunden por millones. Presentes en todo el mundo, algunas especies habitan en los escasos retazos de suelo sin hielo que salpican el interior de la Antártida, donde poco más hay de comer que algún que otro hongo microscópico o bacteria.

Los investigadores ansían resolver el misterio de cómo llegaron *Tullbergia y* otros colémbolos a esas montañas recónditas y de qué modo han logrado sobrevivir a docenas de glaciacio-

EN SÍNTESIS

***Tullbergia*,** un animal diminuto, habita bajo las piedras de las cumbres del interior desolado de la Antártida, donde nada más puede sobrevivir.

Parece haber resistido allí desde hace millones de años, eludiendo de algún modo los casquetes de hielo y las sales tóxicas.

La clave de su supervivencia podría estar escrita en su genoma y en el de otros miembros de la microfauna antártica, y podría reescribir la historia del hielo que cubre el continente.

BYRON ADAMS



LOS INVESTIGADORES recolectan muestras de suelo que contienen *Tullbergia* (*1*) en las laderas pedregosas del monte Speed (*2*), situado a lo largo del glaciar Shackleton, en la Antártida.

nes. Desde la expedición de 2018, Hogg y Adams han estado realizando análisis genéticos de los *Tullbergia* redescubiertos y otros tipos de colémbolos recolectados en la misma expedición. Según me comentaron, esos estudios, que serán publicados en los meses venideros, arrojarán una luz nueva y sorprendente sobre la historia natural de estas especies. Los hallazgos podrían cambiar el relato sobre el avance y el retroceso de los casquetes glaciares del continente a lo largo de millones de años. Especies como *Tullbergia* también están poniendo en entredicho nuestras ideas sobre los límites de la vida y refuerzan la noción de que incluso los ambientes más hostiles del planeta pueden sustentar vida animal compleja.

INMIGRANTES DE LA GLACIACIÓN

La Antártida es conocida por los pingüinos y las focas, pero estos mamíferos habitan exclusivamente en las costas, donde se alimentan de la rica red trófica de fitoplancton, krill y peces. Estas especies emblemáticas no pueden sobrevivir en el interior del continente, una extensión más grande que Estados Unidos y México juntos, cubierta en un 98 por ciento de casquetes glaciares.

Pero desde los primeros años del siglo xx los exploradores comenzaron a descubrir, tierra adentro, pequeñas zonas de suelo sin hielo pobladas por fauna minúscula: colémbolos, ácaros, gusanos y mosquitos ápteros (quironómidos). Necesitada de agua, esta fauna suele medrar en los escasos tapices de líquenes o musgos que crecen en las vertientes orientadas al norte, donde las 24 horas de luz solar que trae consigo el verano antártico derriten la nieve y encharcan el suelo. Paulatinamente los fueron hallando en lugares más fríos y secos, enclavados más al interior.

En 1964, el entomólogo Keith Wise voló hasta el glaciar Shackleton con el propósito de buscar animales en uno de los lugares más remotos del interior del continente. El 13 de diciembre, salió del campamento y esquió varios kilómetros por el glaciar hasta llegar a la base de la cresta del monte Speed. La nieve derretida se precipitaba por un acantilado y empapaba el suelo situado en la base. Allí encontró dos colémbolos: el gris *Antarctophorus subpolaris,* que había visto antes en otros lugares, y el blanco y fantasmagórico *Tullbergia*, desconocido para la ciencia.

En las décadas posteriores a su descubrimiento, los científicos intentaron componer una vaga historia del paraje donde

había sido hallado *Tullbergia*. Los sedimentos marinos revelaron que la Antártida ha sufrido 38 glaciaciones en los últimos cinco millones de años. Durante esos períodos, los glaciares aumentaron de grosor, avanzaron tierra adentro y cubrieron gran parte de las vertientes montañosas que hoy son visibles. Las temperaturas eran entre 5 y 10 °C más bajas que las actuales. La mayoría de los investigadores pensaba que los casquetes de hielo en ascenso «habían aniquilado prácticamente todo rastro de vida», explica Steven Chown, ecólogo polar de la Universidad Monash en Melbourne.

Se suponía que, una vez que la glaciación llegaba a su fin, los glaciares se retraían, retrocedían ladera abajo y dejaban al descubierto una porción más grande de los picos. Esa tierra virgen sería colonizada por especies procedentes de la Patagonia, Nueva Zelanda o Australia, arrastradas por las corrientes marinas o transportadas en las patas embarradas de las aves marinas. Los inmigrantes ocuparían el lugar de los habitantes que habían sido exterminados por el avance de los glaciares. Con la siguiente glaciación, los recién llegados desaparecerían a su vez, hasta que una nueva oleada de colonos volviese a aparecer con el retroceso del hielo. La mayoría de los expertos suponía que las especies que hoy pueblan la Antártida no vivían en ella desde hacía más de 20.000 años.

Tullbergia habría logrado sobrevivir en una estrecha franja de suelo habitable, de escasos metros de ancho

Entonces, en 2005, sobrevino un giro inesperado. Dos equipos independientes publicaron estudios genéticos que contradecían esta visión generalizada. Peter Convey, ecólogo de la Prospección Antártica Británica, en colaboración con Giuliana Allegrucci, de la Universidad de Roma, comparó las secuencias génicas de los quironómidos de la Antártida y de la Patagonia. A raíz de las diferencias en las secuencias de ADN y de premisas básicas acerca de la rapidez con que esas secuencias sufren variaciones al azar, calcularon cuánto tiempo hacía que esas especies se habían separado de sus ancestros comunes. Convey admite que esperaba encontrar una divergencia «del orden de decenas de miles de años», pero en cambio, sus cálculos indicaban que no se habían mezclado desde hacía 68 millones de años. «Nos causó una gran sorpresa», confiesa. Significaba que los quironómidos antárticos no eran en absoluto unos recién llegados, sino descendientes de los habitantes ancestrales del continente.

CINCO MILLONES DE AÑOS AISLADOS

Hace 68 millones de años, la Antártida estaba cubierta por selvas frondosas, habitadas por dinosaurios y mamíferos arcaicos. Aún permanecía unida a Sudamérica, como último vestigio del supercontinente Gondwana, del que África y Australia ya se habían separado. Solo después de desgajarse de Sudamérica, hace unos 35 millones de años, quedó sumida en el invierno perpetuo que acabó con casi todos los seres vivos.

Un segundo estudio publicado en 2005 situó el origen de algunos colémbolos antárticos mucho antes de las últimas glaciaciones. Hogg y Mark Stevens, antiguo doctorando suyo con quien había trabajado en la Universidad de Waikato, calcularon a partir de secuencias génicas el momento en que varios tipos de colémbolos del continente austral divergieron de sus homónimos australianos, neozelandeses y patagónicos. Los resultados mostraron cifras de entre 10 y 20 millones de años, como mínimo.

Sumados a otros hallazgos similares, dejaron a muchos sin argumentos con que explicar de qué modo esos diminutos seres lograron subsistir a lo largo de tantas glaciaciones. Algunos especularon que habrían sobrevivido en valles pequeños y aislados, los llamados valles secos de McMurdo, en el norte de la cordillera Transantártica, a 850 kilómetros del lugar donde Hogg y Adams habían encontrado a *Tullbergia*. Los valles habían permanecido singularmente libres de hielo durante los últimos 12 millones de años. Otros plantearon que durante las glaciaciones se habrían refugiado en afloramientos geotérmicos cercanos a los volcanes que salpican las costas del continente. Y quizás después de sobrevivir una glaciación tras otra en esas regiones costeras, viajaron de algún modo tierra adentro hasta las montañas, como las del glaciar Shackleton.

Pero esas hipótesis no se sostenían con las pruebas recabadas. *Tullbergia* y los demás animales «no se encuentran en ningún otro lugar de la Antártida: ni en las cercanías de los volcanes ni en las costas», explica Adams. Esto socavaba la idea de que habían habitado en esos lugares recónditos en el pasado.

Entre 2006 y 2017, Hogg visitó más de una docena de lugares a lo largo de la cordillera Transantártica para recolectar especímenes vivos. Él y Adams, que lo acompañó en algunos desplazamientos, hallaron cinco especies de colémbolos, todas ellas ya conocidas, pero no dieron con *Tullbergia* hasta que exploraron el monte Speed en 2018.

Cuando Hogg llevó las muestras del colémbolo a su laboratorio, su equipo comenzó a secuenciar los genes. La doctoranda Gemma Collins secuenció un corto fragmento de ADN de cada animal correspondiente al gen de la enzima citocromo *c* oxidasa. Tardó meses en comparar las secuencias de más de 1100 individuos procedentes de distintos puntos de la Transantártica, algunos recolectados años antes. Las comparaciones revelarían qué animales compartían un pasado común, si lo tenían. Indicarían si diferentes poblaciones en diversas localidades habían quedado aisladas entre sí, quizás por la expansión de los casquetes glaciares, o si por el contrario habían sido capaces de migrar a nuevos territorios con la regresión del hielo.

En los períodos templados que separaban las glaciaciones, el casquete occidental del continente habría disminuido de grosor y extensión. Y la banquisa de Ross, que bordea la mayoría de las montañas centrales y meridionales y flota sobre el mar, probablemente desapareció. Ambos acontecimientos habrían hecho posible que el mar abierto avanzase tierra adentro a lo largo de la cadena montañosa, aunque no hasta la altura alcanzada por el casquete de hielo en las montañas. Hogg especuló que, durante esos períodos templados, gracias al aumento de las franjas de tierra sin hielo, la microfauna lograría desplazarse y reproducirse con otras poblaciones de la misma especie hasta entonces aisladas. Los colémbolos pudieron dispersarse flotando en el agua. Hogg explica que «llegaron al nuevo hábitat» y de algún modo se las apañaron para sobrevivir durante 50.000 o 100.000 años conforme el hielo volvía a ascender ladera arriba.

Pero los resultados de *Tullbergia* y *Antarctophorus* indican que incluso en esa época de relativa bonanza, los desplazamientos fueron más limitados de lo que se pensaba. Dos poblaciones de *Antarctophorus* recolectadas en las crestas expuestas emplazadas a ambos lados del glaciar Shackleton no parecían haberse cruzado durante cinco millones de años, a pesar de que apenas las separaban 10 kilómetros, la anchura de la lengua del glaciar. «Resulta chocante; cinco millones es mucho tiempo», afirma Hogg. Parecía como si la especie no se hubiera movido un ápice.

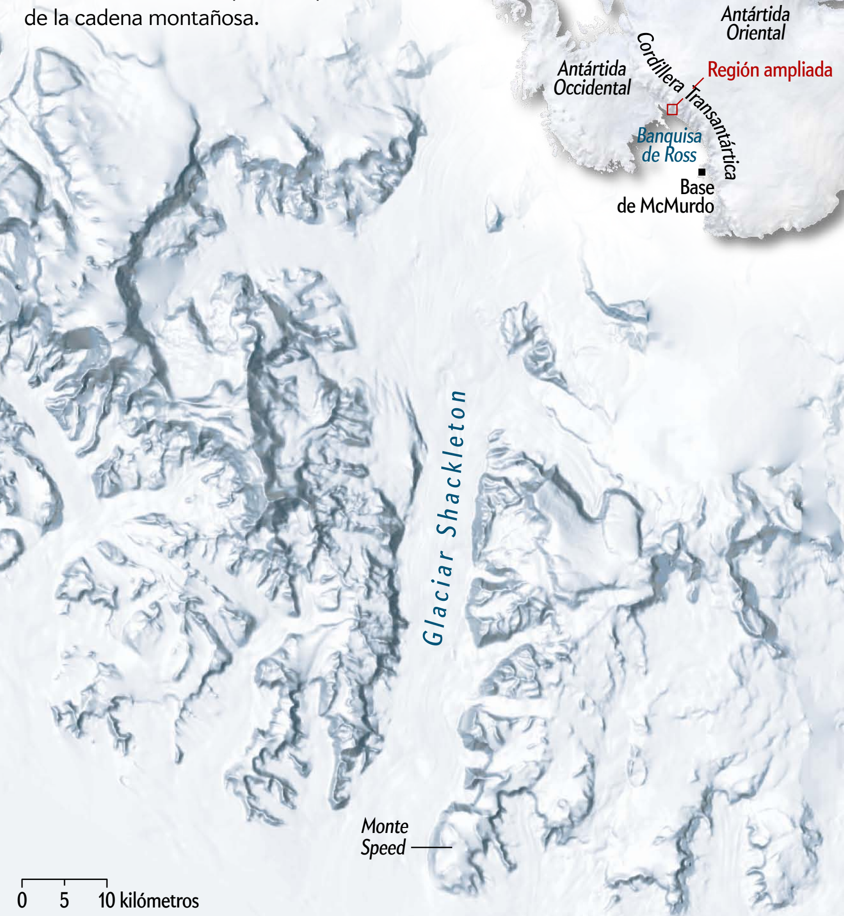
Los indicios geológicos muestran que, hace entre tres y cinco millones de años, durante un período notablemente cálido, el casquete de la Antártida Occidental se desmoronó varias veces. Los colémbolos tal vez flotaron a lo largo de la cadena montañosa a medida que el mar se adentraba en la tierra. Así pudieron haber salvado la brecha de 10 kilómetros y entrar en contacto con otros colémbolos genéticamente distintos. Pero las poblaciones de *Antarctophorus* no lo hicieron. Los análisis genéticos practicados en el laboratorio de Hogg revelaron que los grupos de *Antarctophorus* del glaciar Shackleton no se habían mezclado con otra población enclavada en las montañas 160 kilómetros más al norte, como mínimo desde hacía ocho millones de años. Esto indica que, aunque el casquete occidental se desmoronase, en la cordillera Transantártica aún quedaba el hielo suficiente para impedir cualquier desplazamiento.

El análisis de los *Tullbergia* recolectados alrededor del glaciar Shackleton dejó aún más boquiabiertos a los investigadores: las secuencias génicas de los cuatro lugares eran casi idénticas. «Es como si todos fueran clones», apunta Adams. Eso significaría que todos eran descendientes de una sola pareja y que nunca se cruzaron con individuos provenientes de otros lugares. «Es una suposición que estamos intentando explicar de todas todas», añade.

HIPÓTESIS

Un hogar entre el hielo

La cordillera Transantártica divide en dos el vasto casquete de hielo que cubre la Antártida, pero algunos glaciares, como el Shackleton, se abren paso de este a oeste a través de sus picos. En la vertiente del monte Speed orientada al glaciar, los investigadores han descubierto el sorprendente *Tullbergia*. Es un misterio cómo ha llegado hasta allí. Se ha planteado la hipótesis de que, en las épocas menos frías, la banquisa de Ross desaparecía, los glaciares retrocedían y el mar se internaba tierra adentro, lo que permitiría a estos animalillos flotar y desplazarse por la base de la cadena montañosa.



DILEMA TÓXICO

¿Cómo ha sobrevivido *Tullbergia* durante millones de años, acorralado entre el hielo por espacio de al menos treinta glaciaciones, sin desplazarse más que unos pocos kilómetros y sin contacto con otras poblaciones? Esta pregunta resulta aún más desconcertante porque durante gran parte de ese tiempo quedó atrapado en una estrecha franja entre el hielo y la sal, ambos mortíferos.

Cuando Hogg y Adams volvieron a sobrevolar arriba y abajo el glaciar Shackleton en 2018, divisaron con frecuencia una tenue línea que recorría las laderas de las montañas: unos doscientos metros por encima de la superficie del hielo la roca cambiaba de color, más clara por debajo de la línea y más oscura por encima de ella. Esas «líneas de corte» indican la altura que alcanzó el hielo en el curso de la última glaciación: son el resultado de diferencias sutiles en el modo en que los minerales se oxidan cuando quedan a la intemperie y en contacto con el aire.

Es fácil imaginar que, conforme los glaciares ganaban en grosor, la fauna ascendiera ladera arriba para ponerse a salvo del hielo. Pero hay un problema importante con esa explicación: las partes superiores de las montañas están repletas de sustancias tóxicas. Si uno gira una piedra por encima de la línea de corte, en el Shackleton o en cualquier otra montaña de la Transantártica, comprobará que el suelo bajo ella presenta a menudo costras de sales blancas: «No es sal de roca del Himalaya. Si

MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)



BLANCO E HIRSUTO cuando está vivo, *Tullbergia* se deseca con rapidez y muere al quedar expuesto al aire. En este individuo muerto, teñido con colorante y visto a gran aumento, el exoesqueleto duro parece rojo, y la membrana cuticular, verde. En la base de las antenas se aprecian dos ocelos (*imagen superior*).

uno pasa la lengua por ella sabrá lo que quiero decir», afirma con ironía Adams.

La sal es rica en nitrato, una sustancia tóxica para muchos seres vivos. El nitrato cae incesantemente sobre la Tierra como consecuencia de la reacción de los rayos ultravioleta con los gases atmosféricos, aunque casi nunca se acumula en el suelo porque la lluvia lo arrastra. Solo en los lugares sumamente áridos, como la cordillera Transantártica, se acumula durante milenios hasta que alcanza concentraciones tóxicas. En esas zonas altas también se acumula perclorato, una sustancia oxidante usada en desinfectantes o en propelentes para cohetes y que es famosa por convertir la superficie marciana en un lugar inhóspito, como descubrió la sonda Phoenix Mars Lander.

Las sales dejaban a los colémbolos y los demás animalillos entre la espada y la pared en su intento de escapar al avance de los glaciares: quedarse quieto significaba acabar enterrado en el hielo, y ascender ladera arriba, topar con lugares tóxicos, explica Adams. «Un hábitat realmente nefasto.»

En efecto, Hogg y Adams solo hallaron colémbolos por debajo de la línea divisoria. Pero esos lugares estarían cubiertos por cien metros o más de hielo en el último máximo glacial, y las formas de vida complejas como *Tullbergia* no habrían sobrevivido durante milenios en el hielo. ¿De dónde habían venido pues?

LA HISTORIA REESCRITA

Ningún animal es capaz de sobrevivir sin agua, un hecho que nos ofrece una explicación plausible sobre la asombrosa tenacidad de *Tullbergia*.

A 700 kilómetros al noroeste del glaciar Shackleton, la cordillera Transantártica emerge del interior del continente y comien-

za a correr a lo largo del litoral. Es aquí donde se encuentran los remotos valles secos de McMurdo. A pesar de su aridez, varios albergan lagos cubiertos de hielo, alimentados por el agua de fusión estival. Los lagos son someros, pero a cierta altura, en las paredes de los valles, se observan líneas de depósito que señalan donde estuvo situada antaño la orilla del mar, con arena y guijarros. Esos vestigios indican que algunos de los valles contuvieron en el pasado masas de agua de cientos de metros de profundidad, alimentadas por los arroyos que descendían de las montañas. Con todo, esta idea flaquea porque los valles se abren en el extremo orientado al mar, sin nada que pudiera retener semejantes volúmenes de agua.

Los expertos conjeturan que, en alguna glaciación precedente, el casquete occidental antártico habría avanzado varios cientos de kilómetros en dirección norte, hacia las montañas, represando las bocas de los valles antes del punto donde estas se abren al mar. De ese modo habrían podido surgir lagos extensos. Uno de ellos, el lago glaciar Washburn, tiene como mínimo 300 metros de profundidad.

Durante la década de 1990, Brenda Hall, geóloga en la Universidad de Maine, perforó antiguos sedimentos situados en lo alto de la pared del valle que acoge el lago Washburn y recogió muestras liofilizadas de tapetes de algas que crecieron allí en algún momento. Por medio de la datación con radiocarbono calculó que las algas, y por ende el lago, existieron hace entre 23.000 y 13.000 años, intervalo que coincide prácticamente con el auge del último período glacial. Según Hall, este hallazgo condujo a una discrepancia curiosa: durante la glaciación, los glaciares probablemente se derritieron más de lo que lo hacen ahora.

¿Cómo podía suceder eso precisamente cuando el clima era más frío? Una teoría plantea que la banquisa que cubre los mares circundantes era más extensa entonces, lo cual comportó una disminución de la evaporación, menos nubosidad, menos nevadas y más luz solar que calentaba las rocas oscuras de las montañas. A su vez, esto habría intensificado el deshielo. La fusión pudo afectar a toda la cordillera, incluidos los lugares donde se encontró a *Tullbergia*.

En estrecha relación con lo anterior aparece un fenómeno extraño que se ha venido en llamar el efecto invernadero en estado sólido. Gran parte de la luz solar que incide en el glaciar es reflejada por el manto de nieve exterior. Pero en la cordillera Transantártica, donde los vientos secos y fuertes evaporan lentamente la nieve y el hielo, los glaciares suelen lucir una capa profunda de hielo relativamente transparente en la superficie. La luz penetra un metro en ella, calentándola y derritiéndola desde el interior. Andrew Fountain, glaciólogo de la Universidad Estatal de Portland, ha comprobado que este fenómeno ocurre a temperaturas del aire de hasta –10 ºC.

Hall lo ha presenciado en las montañas meridionales, hasta 200 kilómetros al sur del glaciar Shackleton. «En días despejados y radiantes he visto cómo esas películas de agua corrían y se precipitaban por el paredón de hielo», explica.

A Hogg y Adams tales mecanismos les brindan pistas importantes sobre el modo en que *Tullbergia* y *Antarctophorus*, así como pequeños gusanos, ácaros y otra microfauna, han sobrevivido a docenas de glaciaciones en las márgenes de los glaciares como el Shackleton. Adams los describe como hábitats propicios, orientados al norte (la cara de solana en el hemisferio sur), con la proporción justa de rocas oscuras y de hielo transparente. A lo largo del borde del hielo se situaría una estrecha franja habitable, tal vez de pocos metros de ancho, donde la escasa agua de fusión pudo lavar el suelo de sales y ayudar a rehidratar a los animalillos, «por lo menos muy de tarde en tarde», aclara Adams. Conforme la glaciación avanzaba y el hielo ascendía gradualmente ladera arriba, *Tullbergia* también pudo trepar lentamente, quizás a razón de un metro escaso al año, si tuvo la suerte de encontrar hábitats propicios en su camino.

Esas explicaciones suenan plausibles pero son incompletas. Hogg y Adams, ninguno de los cuales ha regresado al glaciar Shackleton, necesitan vincular la genética con una cronología clara de los avances y retrocesos del hielo antártico. También precisan saber si esa pauta es extensible a otras especies. Con la ayuda de sus estudiantes están intentando secuenciar el ADN del mismo gen del citocromo en una especie de ácaro y en otra de nematodo que hallaron en el glaciar Shackleton y en otros puntos del sur de la Transantártica. Esperan que las secuencias aclaren desde cuándo viven esos otros animales allí, cuáles fueron sus desplazamientos en el pasado y cómo permanecieron vivos.

Lo que es evidente es que algunos sobrevivieron por el más estrecho de los márgenes. Durante el retroceso de los glaciares pudieron fundar nuevas colonias en las montañas cercanas, pero con cada nueva glaciación, la mayoría de las poblaciones desaparecieron. El ADN de *Tullbergia* conserva las cicatrices de esa ruda historia. El hecho de que todos y cada uno de los individuos hallados en torno al glaciar Shackleton tengan secuencias génicas idénticas indica que en algún momento solo consiguieron sobrevivir dos individuos. Todos los ejemplares vivos descienden de esa pareja de progenitores, que habrían sido lo bastante afortunados como para ser arrastrados por un vendaval hasta una pequeña parcela de suelo acogedor, del tamaño de una cancha de baloncesto. *Tullbergia* «estuvo al borde mismo de la extinción», apunta Adams.

Es obvio que comunidades enteras de plantas y animales han desaparecido de la Antártida en las sucesivas extinciones que se han sucedido a lo largo de la historia de la Tierra. ¿Ayudaría una Antártida más cálida y húmeda a la recuperación de *Tullbergia*? Adams regresó en enero a los valles secos de McMurdo. Los niveles de los lagos están aumentando, los suelos son cada vez más húmedos y la abundancia de la microfauna edáfica, como ciertos gusanos nematodos, va en aumento. Al mismo tiempo, los supervivientes que han permanecido en los suelos gélidos, secos y yermos «escasean cada vez más y su área de distribución se está reduciendo», alerta Adams. Tal vez los recién llegados estén desplazando a los antiguos residentes.

La pregunta es si *Tullbergia* sufrirá un destino similar. «A la vista de lo que ha hecho en el pasado, intuyo que saldrá bien librado, siempre que no tenga que competir con especies invasoras.»

PARA SABER MÁS

Nematodes in a polar desert reveal the relative role of biotic interactions in the coexistence of soil animals. Tancredi Caruso et al. en *Communications Biology*, vol. 2, artículo n.º 63, febrero de 2019.

Spatial and temporal scales matter when assessing the species and genetic diversity of springtails (Collembola) in Antarctica. Gemma E. Collins et al. en *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 7, artículo n.º 76, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vida bajo el hielo antártico. Douglas Fox en *IyC*, septiembre de 2015.

MATEMÁTICAS

LAS MATEMÁTICAS A VISTA DE PÁJARO

Manon Bischoff



La teoría de categorías, una disciplina surgida en los últimos 70 años, permite descubrir conexiones inesperadas entre distintas áreas de las matemáticas. Ha encontrado aplicaciones en física, informática y lingüística



Probabilistán
Ducado de la Teoría de Juegos
Estadistigrado
Remolino del Teorema de Gödel
Bahía de la Teoría de Modelos
Océano de la Lógica
Cuerpos
Axioma de Elección
Anillos
Costa del Álgebra Universal

LAS DIFERENTES DISCIPLINAS MATEMÁTICAS aparecen representadas en el mundo ficticio de «Matematistán». La teoría de categorías ocupa un lugar especial, ya que ofrece una visión global de las distintas áreas.

Manon Bischoff es física teórica y redactora de *Spektrum der Wissenschaft*, edición alemana de *Investigación y Ciencia*.



Imagínese que sobrevuela un mundo llamado Matematistán. Más o menos en el centro divisa el conocido reino de la Aritmética, en el que los números se suman, multiplican, restan o dividen entre sí. Con él limitan las colinas de la Teoría de Números, con sus números primos y otras construcciones singulares, y más al sur se encuentra el enorme califato de al-Gebra, donde no solo se combinan los números (como en el reino de la Aritmética), sino también objetos más complicados como las matrices.

Desde lo alto, los detalles de cada región se desdibujan y solo son reconocibles las grandes estructuras, de modo que podemos identificar los puentes y zonas fronterizas que conectan los distintos reinos. Así, entre la tundra de la Topología y el califato de al-Gebra hallamos el bosque de la Topología Algebraica, donde se funden los conceptos de ambas áreas: por ejemplo, los habitantes de la tundra clasifican los objetos geométricos a partir del número de agujeros que presentan, y los topólogos algebraicos calculan dicho número usando construcciones algebraicas como las funciones o los grupos.

Muchos investigadores desearían tener esta visión panorámica de las distintas ramas de las matemáticas. Durante siglos, hubo polímatas versados en casi todas las áreas del saber, desde la filosofía hasta la física o la medicina, y que se servían de sus conocimientos en una especialidad para progresar en las otras. Hoy en día esto es impensable: es muy probable que un experto en teoría de números y otro en estadística tengan dificultades para entenderse, aun siendo ambos matemáticos.

Con todo, las distintas disciplinas matemáticas no son tan diferentes como podría parecer a primera vista, y los científicos encuentran continuamente semejanzas estructurales entre ellas. Por ejemplo, cuando un problema perteneciente al dominio del análisis (que se ocupa sobre todo de las funciones «suaves») se parece a una cuestión no resuelta de la teoría de números, es posible aplicar las herramientas de uno de los campos en el otro. Pero debemos estar dispuestos a abandonar el reino propio y adoptar una visión aérea, para no perdernos en los detalles de ninguna de las disciplinas. Y eso es justo lo que persigue la teoría de categorías.

«Siempre me han atraído esos momentos eureka en los que uno comprende que es posible unificar ideas aparentemente dispares», afirma Tai-Danae Bradley, matemática de la Universidad de la Ciudad de Nueva York. «Por eso fue muy emocionante descubrir una rama de las matemáticas que ayuda a pensar con claridad sobre estos conceptos transversales.»

No obstante, ese cambio de perspectiva también tiene desventajas. Quienes se dedican a la teoría de categorías se mueven en esferas tan elevadas que apenas producen resultados explícitos: nunca resolverán una ecuación diferencial o calcularán una integral. Pero pueden descubrir nuevos caminos que conduzcan a la solución de un problema concreto, aunque para calcularla haya que volver a poner los pies en la tierra y trabajar en la disciplina correspondiente.

Al principio, la teoría de categorías no tuvo muy buena acogida, y los matemáticos a menudo se referían a ella —con cierta sorna— como «sinsentido abstracto». Pero desde entonces su utilidad ha quedado demostrada fuera de toda duda, y muchos avances matemáticos de los últimos 70 años serían impensables sin la teoría de categorías. Aun así, los expertos siguen sin ponerse de acuerdo sobre si se trata de una teoría independiente o tan solo de un sistema conceptual útil para describir cuestiones complicadas de forma más sencilla.

Aunque se considera una disciplina muy abstracta, los expertos de otras especialidades recurren cada vez más a la teoría de categorías para arrojar nueva luz sobre sus problemas. Por ejemplo, los informáticos la usan para desarrollar nuevos lenguajes de programación, y los lingüistas, para descubrir semejanzas gramaticales entre diferentes idiomas.

EN SÍNTESIS

La teoría de categorías permite «planear» sobre las diversas ramas de las matemáticas, lo que revela conexiones inesperadas. Sin ella no existirían la geometría algebraica o la topología algebraica.

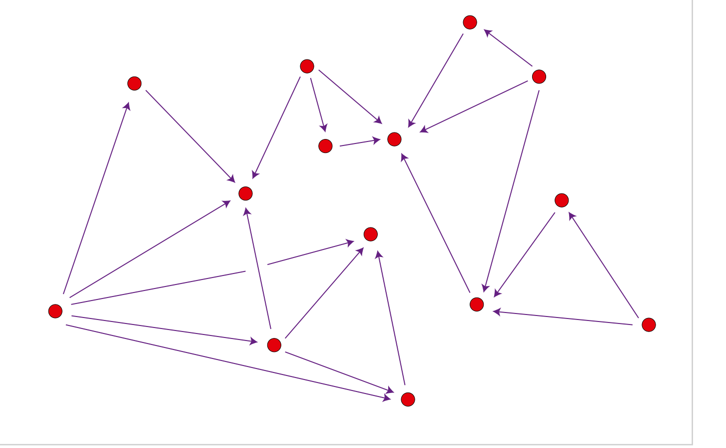
Ese cambio de perspectiva nos impide distinguir los detalles, por lo que la teoría de categorías no proporciona resultados explícitos, aunque puede mostrar nuevas maneras de resolver un problema concreto.

Cada vez hay más científicos de otras áreas, como físicos o lingüistas, que recurren a esta teoría abstracta para arrojar luz sobre los problemas de sus disciplinas.

PÁGINAS ANTERIORES: MARTIN KUPPE

Objetos y transformaciones

Una categoría consiste en una colección de objetos (*A*, *B*, *C*..., *puntos rojos*) y una serie de transformaciones (*f*, *g*, *h*..., *flechas moradas*) llamadas morfismos, cada una de las cuales relaciona exactamente dos objetos ($f: A \to B$). Además, para cada objeto hay un morfismo neutro ($1_A: A \to A$) y si aplicamos secuencialmente dos morfismos de la forma $f: A \to B$ y $g: B \to C$, obtenemos otro dado por $g \circ f: A \to C$. Esta operación de composición satisface la propiedad asociativa, $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$.



RECETAS PARA CALCULAR

Si las categorías se adaptan tan bien a tantas disciplinas es gracias a su definición completamente general: una categoría es un conjunto de objetos que se pueden transformar entre ellos mediante «morfismos». Un ejemplo de categoría es la que tiene a los números naturales (n, m...) como objetos y a las funciones que los relacionan ($f: n \to m$) como morfismos. O la que considera el conjunto de los números naturales como único objeto y todas las funciones que convierten ese conjunto en sí mismo como morfismos. Pero también es posible que los objetos sean superficies y las transformaciones que deforman unas en otras constituyan los morfismos. De forma general, podemos representar una categoría como un conjunto de flechas (los morfismos) que conectan un conjunto de puntos (los objetos). Lo importante no es qué representan exactamente las flechas y los puntos, sino cómo se relacionan.

Hace 70 años, ese punto de vista supuso un drástico cambio de paradigma. La teoría de conjuntos, sobre la que se basan casi todas las matemáticas, define los objetos de cada campo de forma muy precisa. En la teoría de categorías, por el contrario, los números naturales y las formas geométricas pueden resultar indistinguibles, mientras que la categoría de los números que se relacionan entre sí mediante funciones continuas es distinta a la categoría de los números conectados por funciones diferenciables.

En la teoría de categorías, un objeto queda completamente definido por su relación con los demás objetos, sin importar si estos son números, superficies o algo más abstracto. Aunque pueda parecer extraño, la idea no es nueva: en física, por ejemplo, una manera de caracterizar una partícula es bombardearla con otras partículas y estudiar sus interacciones.

La teoría de categorías brinda a los matemáticos un marco teórico general que pueden llenar con objetos y transformaciones de sus respectivos campos. No hace falta distinguir entre las distintas disciplinas, solo concentrarse en las estructuras subyacentes.

Y es posible ir más lejos: dado que no importa con qué objetos llenamos una categoría, podemos llenarla con categorías, con lo que obtenemos una «categoría superior». Eso permite descubrir puentes entre diferentes disciplinas matemáticas, los cuales se corresponden con los «functores», las transformaciones que convierten una categoría en otra. Uno de los ejemplos más famosos de estos puentes lo halló el filósofo y matemático René Descartes en el siglo XVII, mucho antes de que apareciera la teoría de categorías. Descartes constató que muchos problemas geométricos podían resolverse mediante ecuaciones algebraicas e introdujo los sistemas de coordenadas cartesianas (llamadas así en su honor), que sirvieron de base para la primera relación entre la geometría y el álgebra [*véase* «René Descartes», por Alistair C. Crombie; *Grandes matemáticos*, colección TEMAS, n.º 1, 1995]. La conexión entre estos dos campos puede expresarse en términos de categorías relacionadas por un functor, es decir, a través de una categoría superior.

RELACIONES INESPERADAS

No obstante, el nacimiento de la teoría de categorías aún se hizo esperar 300 años. En 1941, el matemático Saunders Mac Lane dio una serie de seis charlas en la Universidad de Michigan sobre sus resultados más recientes en el campo de la teoría de números. Entre el público se encontraba su colega Samuel Eilenberg, quien sin embargo no pudo asistir a la última charla. Pero poco después fue a ver a Mac Lane y este le repitió la presentación en privado. Eilenberg no daba crédito: su colega había construido un objeto matemático que él ya se había encontrado en un contexto distinto, la topología.

Eso parecía bastante extraño, ya que la teoría de números y la topología no tienen demasiado en común. La topología es una especie de geometría que no se preocupa de medir distancias o ángulos: también describe formas y cuerpos, pero sin entrar en los detalles. A veces se dice que la topología es la «geometría de la plastilina», porque en ella dos objetos son idénticos si podemos deformar uno hasta convertirlo en el otro sin necesidad de hacer agujeros. La teoría de números, en cambio, se ocupa de sistemas numéricos. Contra todo pronóstico, ambos campos están íntimamente relacionados con el álgebra.

A diferencia de lo que ocurrió con la geometría, los matemáticos tardaron mucho en comprender que era posible traducir conceptos topológicos al lenguaje del álgebra. A principios del siglo XX, la topología algebraica aún estaba en pañales, como consecuencia de la inexactitud inherente a la topología. Por ejemplo, una ecuación sencilla como $x^2 + y^2 = 1$ corresponde a una circunferencia, mientras que una elipse está descrita por una expresión distinta; sin embargo, ambas curvas son idénticas desde un punto de vista topológico.

Como las funciones no resultaban de mucha ayuda, los matemáticos recurrieron a otros objetos algebraicos: los números

ILUSTRACIONES DE MANON BISCHOFF Y *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

enteros. Los investigadores clasifican los objetos por medio de «invariantes topológicos», como el número de agujeros, en el caso de una superficie. Desde la óptica de la topología, un panecillo y un *pretzel* (la típica galleta alemana en forma de lazo) son diferentes, mientras que una rosquilla y una taza son idénticas.

Aunque esta sencilla clasificación es accesible incluso para un niño, trasladarla a un plano formal puede resultar mucho más complicado. ¿Hay que visualizar cada forma geométrica para contar sus agujeros y determinar así su invariante topológico? Puede que eso sea factible en dos dimensiones, pero en cuanto uno se plantea problemas en dimensiones superiores, surgen las dificultades.

Eso llevó a los matemáticos a buscar un método algebraico para detectar agujeros. En 1895, Henri Poincaré fue uno de los primeros en comprender que una opción era estudiar todas las curvas cerradas que podemos trazar sobre la forma geométrica. Cuando cada una de estas curvas puede reducirse a un punto sin abandonar la superficie ni atravesarla, concluimos que no hay agujeros. Eso es justo lo que ocurre con una esfera; por el contrario, en el caso de un toro —una superficie con forma de dónut— hay dos clases de curvas que no pueden contraerse a un punto (*véase la figura en la página siguiente*).

Pero los objetos propios de la topología, los llamados espacios topológicos, no siempre son tan intuitivos como la esfera o el toro: pueden ser formas disconexas en muchas dimensiones o estar compuestos por elementos de sistemas numéricos peculiares. En casos así, ya no resulta tan fácil clasificarlos.

Cuando la matemática Emmy Noether abordó este problema a principios del siglo xx, se le ocurrió que los espacios topológicos no solo estaban relacionados con los números enteros, sino también con los grupos. En su versión más sencilla, estas estructuras algebraicas están formadas por transformaciones como las rotaciones o las reflexiones. En términos generales, la definición de un grupo se parece a la de una categoría: es un conjunto de objetos que pueden transformarse entre sí y donde hay un elemento neutro. Pero los grupos necesitan cumplir otra condición: cada elemento tiene un inverso, de manera que al combinar ambos se obtiene el elemento neutro.

Noether descubrió que hay un tipo de grupos, los llamados grupos de homología, a partir de los cuales se pueden calcular unos números característicos relacionados con los invariantes de los espacios topológicos. Cuando deformamos un objeto geométrico sin cambiar sus invariantes, existe una transformación muy parecida de los grupos de homología que también preserva sus números característicos. Por lo tanto, si uno no logra calcular los invariantes de un espacio topológico, puede recurrir a los grupos de homología pertinentes.

El hallazgo de Noether marcó el inicio de una nueva era en la topología algebraica: de repente, la atención ya no se centraba solo en los espacios topológicos, sino también en las relaciones entre ellos, ya que las transformaciones que deforman un espacio sin crear agujeros en él están conectadas con las aplicaciones entre los correspondientes grupos de homología. Aquí ya se vislumbraba la característica principal de la teoría de categorías, que pone el foco en las relaciones entre objetos.

DÓNUTS ENROLLADOS

Antes de incorporarse a la Universidad de Michigan, Eilenberg había trabajado en los grupos de homología de espacios complicados. Por su parte, Mac Lane investigaba grupos que aparecen en teoría de números. Al combinar unos números con otros, es frecuente acabar identificando estructuras de grupo: por ejemplo, el conjunto de los números enteros con la operación suma constituye un grupo. En un campo tan abstracto como la teoría de números, a menudo resulta útil estudiar los grupos asociados en vez de los propios números.

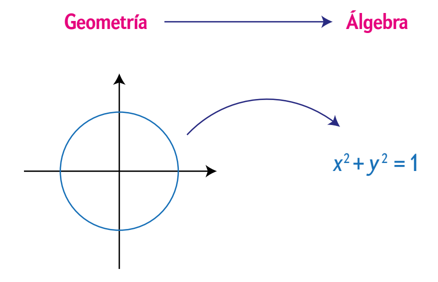
Por aquel entonces, Mac Lane estaba interesado en sistemas numéricos extremadamente complicados. A fin de simplificar sus cálculos, tradujo el problema al lenguaje del álgebra, para lo cual construyó un tipo especial de grupo: una «extensión de grupo». En términos sencillos, ese objeto consiste en un grupo *G* ampliado por otro grupo *H,* de tal forma que el resultado sigue siendo un grupo.

GEOMETRÍA Y ÁLGEBRA

Grothendieck y la geometría algebraica

Trescientos años antes de la teoría de categorías, René Descartes ya se dio cuenta de que existía una conexión entre la geometría (que estudia conjuntos de puntos en el espacio) y el álgebra (que se ocupa de las relaciones entre objetos abstractos). Por ejemplo, para determinar los puntos donde se cortan dos curvas, uno puede, o bien dibujarlas y leer el resultado en el sistema de coordenadas, o bien resolver el sistema formado por las ecuaciones algebraicas de las curvas.

Alexander Grothendieck demostró formalmente la existencia de esa conexión en la década de 1970. Desde la vertiente algebraica, investigó la categoría de los anillos conmutativos, que son conjuntos de elementos que podemos sumar y multiplicar, como los números enteros. Otro ejemplo son los polinomios de la forma $a_n x^n + ... + a_1 x + a_0$. La categoría de estos anillos contiene aplicaciones *f* que transforman un anillo *R* en otro *S* ($f: R \to S$), por ejemplo el anillo de los polinomios en el de los números reales.



Por lo que respecta a la geometría, Grothendieck se centró en la categoría de los esquemas afines, que contiene todos los espacios topológicos construidos sobre anillos conmutativos. Así, el espacio correspondiente al anillo de los polinomios es una curva algebraica.

Al extender la geometría algebraica desde las meras curvas a los esquemas, Grothendieck revolucionó el campo y pudo demostrar que existe una correspondencia uno a uno que relaciona el álgebra y la geometría: para cada anillo conmutativo hay precisamente un esquema afín, y viceversa. Así, desde la óptica de la teoría de categorías, estas dos categorías son equivalentes, y eso permite «traducir» teoremas de un área a la otra.

Eilenberg reconoció enseguida la extensión de grupo de Mac Lane: ya la había visto en un trabajo donde su colega Norman Steenrod investigaba un peculiar espacio topológico. Para construirlo, tomamos un toro «sólido» y en su interior arrollamos p veces un segundo toro, en el interior del cual arrollamos p veces un tercer toro, y así hasta el infinito. La intersección de todos estos toros produce un espacio topológico cuyo grupo de homología se corresponde con el grupo de Mac Lane.

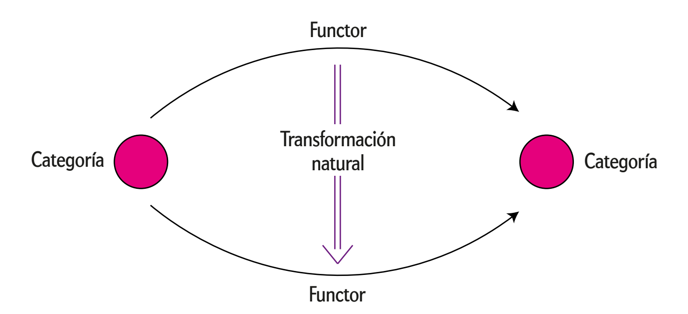
«Nos pasamos la noche en vela intentando entender por qué ocurría esto», recuerda Mac Lane. Ese fue el comienzo de una fructífera colaboración (y de una amistad de por vida) entre los dos investigadores.

Lo más fascinante era que los cálculos de Mac Lane resultaban mucho más sencillos que los asociados con los espacios topológicos. Hallar los grupos de homología suele ser muy difícil, pero, tras meses de duro trabajo, los investigadores descubrieron que las extensiones de grupo constituían una especie de puente entre diferentes métodos algebraicos para determinar las propiedades topológicas de un espacio. Esto supuso un verdadero avance: cuando una técnica algebraica no funciona, las extensiones de grupo pueden mostrar otra vía para investigar un espacio topológico.

En los años siguientes, los dos investigadores encontraron más coincidencias entre el álgebra y la topología. «Era más de lo que esperábamos», reconoce Mac Lane, «y nos vimos obligados a inventar las categorías para describirlo». Pero no definieron las categorías como los objetos abstractos que conocemos hoy en día, sino que se limitaron al caso concreto de una categoría formada por grupos.

En un principio, otros científicos no prestaron demasiada atención a las categorías. Alexander Grothendieck fue el primero en darse cuenta de la utilidad del concepto. Este matemático se contaba entre los más influyentes de su campo, al menos hasta que en 1991 se retiró a una aldea de montaña francesa y rompió todo contacto con el mundo exterior [*véase* «Alexander Grothendieck, de eminencia a eremita», por Winfried Scharlau; Investigación y Ciencia, junio de 2016].

Hasta poco después de doctorarse, Grothendieck se había dedicado al análisis funcional, pero sus intereses de investigación cambiaron cuando emigró a los Estados Unidos a mediados de la década de 1950. No había obtenido ningún puesto académico en Francia porque se había negado a adquirir la nacionalidad francesa para evitar el servicio militar, y por ello permaneció apátrida durante muchos años.



UN FUNCTOR es una aplicación entre dos categorías, mientras que una transformación natural relaciona dos functores. Los matemáticos generalizan estos conceptos por medio de «categorías superiores».

UN SOLITARIO REVOLUCIONA LAS MATEMÁTICAS

Durante una estancia de investigación en Kansas, Grothendieck comenzó a interesarse por la topología algebraica, un campo que por entonces aún era bastante caótico. De hecho, hoy en día se sigue buscando una regla general para hallar el grupo de homología de un espacio topológico arbitrario. Lo que tenemos son diversos métodos, u homologías, en función del tipo de espacio. Grothendieck logró crear una base común para muchos de estos conceptos, y también encontró más homologías con las que calcular los grupos de homología de un espacio topológico.

A Grothendieck le interesaban sobre todo los «haces», que surgen al investigar las estructuras algebraicas de espacios topológicos complicados. Desde un punto de vista formal, los espacios topológicos se definen como uniones de conjuntos (se construyen «pegando» regiones individuales). Cuando consideramos funciones u otros objetos algebraicos sobre uno de estos espacios, es necesario saber cómo se comportan en los empalmes, y ahí es donde la teoría de haces resulta útil.

Los haces también juegan un papel importante en física, por ejemplo en la teoría general de la relatividad, que describe cómo



A DIFERENCIA DE LO QUE OCURRE en una superficie esférica, en un toro hay dos clases de curvas cerradas (*amarilla y verde*) que no pueden reducirse a un punto sin abandonar la superficie.

curvan las masas el espaciotiempo. Así pues, para comprender cómo se mueven las partículas en el universo hay que resolver las ecuaciones físicas en un espaciotiempo curvado, pero los físicos pueden recurrir a un truco: fijarse solo en una pequeña región del espaciotiempo, donde este es aproximadamente plano (del mismo modo que la Tierra parece plana a nuestro alrededor). Eso les permite resolver las ecuaciones para el caso plano en cada punto y luego pegar esas soluciones.

La teoría de haces, por lo general, solo actúa de modo local: uno trabaja en el espacio punto a punto, sin tener en cuenta su estructura global. Por ejemplo, no hay ninguna diferencia entre pegar las funciones en una superficie cilíndrica o en una cinta de Möbius. Para la topología, sin embargo, las propiedades globales de un espacio son cruciales: el cilindro y la cinta de Möbius son espacios radicalmente distintos. Por eso, a mediados de la década de 1950, muchos matemáticos buscaban una teoría homológica de haces que aclarase la relación entre las características globales del espacio y los objetos algebraicos definidos en él.

Eilenberg también sabía que debía existir una teoría homológica de haces, pero ni él ni sus colegas consiguieron construirla. Grothendieck encontró una solución, dando un rodeo y centrándose primero en las categorías. A diferencia de Mac Lane y Eilenberg, que usaron las categorías para abordar un problema concreto, Grothendieck apuntaba más alto: buscaba un marco general que extendiera las homologías. Eso le llevó a tratar las categorías no solo como una herramienta, sino como una teoría independiente que fusionaba diversos campos. Así pudo identificar conexiones entre las conexiones: de repente entendió cómo se relacionaban algunas homologías. Había encontrado aplicaciones que transformaban unas homologías en otras, y eso le permitió desarrollar nuevas homologías, entre ellas una para los haces.

Tras estos descubrimientos revolucionarios, el polifacético matemático dirigió su atención a un nuevo campo, el de la geometría algebraica, que se ocupa de las formas geométricas que se obtienen a partir de ecuaciones polinómicas como $3x^4y^2 + 6y^2 + 5 = 0$. De nuevo, la teoría de categorías le permitió dejar una huella indeleble en esta área.

Grothendieck llevó la geometría algebraica a un nuevo nivel de abstracción, al aceptar como objetos de investigación no solo los polinomios, sino «anillos» completamente generales. Un anillo es una estructura similar a un grupo, pero donde los elementos se relacionan a través de dos operaciones. Un ejemplo son los polinomios, que pueden sumarse y multiplicarse entre sí. Esta extensión a los anillos reveló conexiones inesperadas entre la geometría algebraica y otras disciplinas matemáticas, como la teoría de números. Es muy difícil imaginar cómo serían estos campos hoy en día sin la contribución de Grothendieck.

UNA NUEVA BASE PARA LAS MATEMÁTICAS

Gracias a estos y otros resultados notables, la teoría de categorías se hizo cada vez más popular. En su tesis doctoral de 1963, William Lawvere fue un paso más allá: planteó la posibilidad de basar todas las matemáticas en la teoría de categorías, que sustituiría así a la teoría de conjuntos. A él y a muchos de sus colegas les atraía la idea de un marco general donde lo importante no fuera la naturaleza de los objetos, sino las relaciones entre ellos. Según Bradley, «muchos matemáticos piensan en términos de categorías, aunque no usen todos los conceptos o teoremas».

Así que en lugar de construir las matemáticas directamente sobre los axiomas de la teoría de conjuntos de Zermelo-Fraenkel, Lawvere propuso usar las categorías para definir los conjuntos

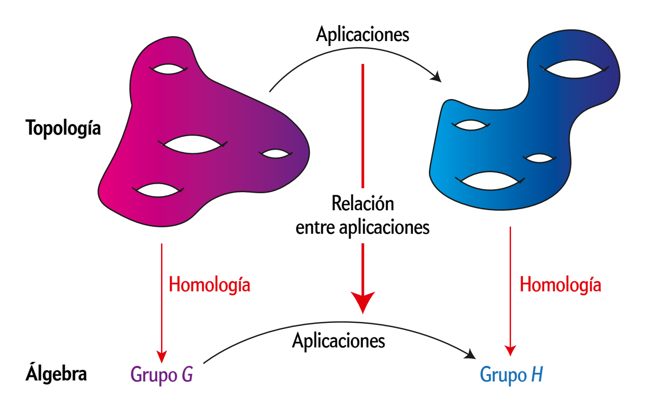
HOMOLOGÍAS

Triangulaciones y grupos de homología

Aún no conocemos ningún método general para calcular los grupos de homología de un espacio topológico cualquiera, aunque en algunos casos especiales sí hay formas de determinarlos. Un ejemplo son las triangulaciones. En un espacio topológico simple como una esfera o un toro, es posible trazar una red de triángulos que recubra toda la superficie. De esta forma obtenemos un poliedro con vértices, aristas y caras a partir de la superficie suave original.

En 1750, Leonhard Euler se dio cuenta de que había una manera sencilla de contar el número de agujeros de esos poliedros. Si al número de vértices (V) de una triangulación le restamos el de aristas (A) y le sumamos el de caras (C), obtenemos un invariante topológico ($V - A + C = \chi$). Esta «característica de Euler» χ siempre es 2 para una esfera (independientemente de la triangulación que escojamos) y 0 para un toro.

La característica de Euler se puede escribir en función del número de agujeros, o «género», g de la superficie como $\chi = 2 - 2g$. (Por ejemplo, para la esfera $g = 0$ y para el toro $g = 1$, de donde se deducen los valores de χ mencionados más arriba.) A partir de los vértices, aristas y caras pueden definirse grupos que sirven para construir los grupos de homología del espacio topológico de partida.



Actualmente se usan ordenadores para calcular las triangulaciones y los correspondientes grupos de homología. Por desgracia, no es posible triangular cualquier espacio topológico: el método solo es fiable para espacios de dimensión menor o igual que tres. Las estructuras de dimensiones superiores a veces adoptan formas tan complejas que impiden la triangulación. En esos casos hay que recurrir a otros métodos para hallar los grupos de homología.

y a partir de ahí derivar todo lo demás. No obstante, pocos matemáticos se interesaron por este enfoque. «Los científicos dedican su tiempo a cosas más interesantes», apunta Steve Awodey, de la Universidad Carnegie Mellon. Pero algunos conceptos de la teoría de categorías dieron lugar a la teoría homotópica de tipos (HoTT, por sus siglas en inglés), que estableció el recientemente fallecido Vladimir Voevodsky, junto a Awodey y otros investigadores. «Esa teoría requiere, como mínimo, reescribir los fundamentos de las matemáticas, pero no por motivos filosóficos, sino prácticos», afirma Awodey. Uno de los objetivos de la HoTT es lograr que los ordenadores sean capaces de manejar formalismos matemáticos como las demostraciones, para poder comprobarlos de manera más rápida y fácil.

Hoy ya nadie cuestiona la utilidad de la teoría de categorías. Sin ella no existirían la geometría algebraica ni la topología algebraica, al menos no en la forma en que las conocemos. Con todo, algunos investigadores no la consideran una teoría independiente. «La teoría de categorías no flota libre en el aire, sino que siempre aparece ligada a otra disciplina. Así que para mí es más bien un marco conceptual», razona Christoph Schweigert, de la Universidad de Hamburgo. La potencia de la teoría de categorías radica en su capacidad para descubrir relaciones útiles que luego pueden aplicarse a situaciones concretas con las herramientas de otras áreas matemáticas, como el álgebra o la topología.

Pero otros investigadores no comparten esa visión. «La teoría de categorías también tiene ramas autónomas. Hay muchos matemáticos que son teóricos de las categorías y hay congresos, revistas e incontables publicaciones sobre el tema», replica Awodey.

Lo que está claro es que la teoría de categorías sigue generando controversia. En particular, si nos planteamos el significado exacto de «equivalencia», la teoría de categorías y la de conjuntos conducen a respuestas dispares. Desde el punto de vista de la teoría de conjuntos, es fácil decidir si dos cosas son idénticas, ya que los objetos están definidos de manera precisa. En la teoría de categorías, la situación es muy distinta: por ejemplo, no existen los números naturales, solo el concepto de número natural. Desde la perspectiva de las categorías, dos cosas son iguales si son isomorfas, es decir, si existe una aplicación (y su correspondiente aplicación inversa) que las relacione. Esta cuestión condujo en 2018 a una disputa entre tres famosos matemáticos.

Hablamos de la célebre conjetura *abc*, que Shinichi Mochizuki, de la Universidad de Kioto, afirmó haber demostrado en 2012. Su prueba ocupa unas 500 páginas que a su vez refieren a otras 500 páginas de material suplementario, y los investigadores de todo el mundo han tenido grandes dificultades para seguirla, dado su inusual estilo. Seis años más tarde, Jakob Stix, de la Universidad de Fráncfort, y Peter Scholze, de la Universidad de Bonn (y galardonado con la medalla Fields en 2018), anunciaron que creían haber encontrado un error en el argumento, el cual aparece si en cierto lugar de la prueba se tratan unos objetos isomorfos como idénticos. Mochizuki se mantiene firme en que esos objetos deben distinguirse, mientras que Stix y Scholze son de la opinión contraria. Es de esperar que pronto se demuestre quién tiene razón.

UN MUNDO LLENO DE CATEGORÍAS

Mientras tanto, algunos científicos realizan grandes esfuerzos para aplicar la teoría de categorías a problemas de otras áreas del conocimiento, lo que podría ayudar a comprender mejor sistemas complejos como los circuitos eléctricos o las reacciones químicas. John Carlos Baez, de la Universidad de California en Riverside, ha organizado en los últimos tres años varias conferencias sobre las aplicaciones de la teoría de categorías, a fin de demostrar que esta abstracta teoría también puede ser útil en física, informática, lingüística o biología, entre otros muchos campos.

Así, los físicos del estado sólido emplean las categorías para describir las llamadas fases topológicas, unos estados exóticos de la materia descubiertos hace poco [*véase* «Aislantes topológicos», por David Carpentier y Laurent Lévy; Investigación y Ciencia, agosto de 2015]. Los informáticos las usan para desarrollar nuevos lenguajes de programación más robustos frente a errores, el más conocido de los cuales se denomina Haskell. Los principios de la teoría de categorías ayudan a los biólogos a describir cómo se reparan y reemplazan las enzimas en los sistemas metabólicos, y a los químicos a poner orden en complicadas reacciones entre diversas moléculas. Y hasta las ciencias sociales se benefician de la abstracta teoría: por ejemplo, los lingüistas recurren a ella para descubrir semejanzas gramaticales entre idiomas muy diferentes.

Además, la teoría de categorías puede acercar a investigadores de distintas disciplinas. Ya lo consiguió en el pasado con los algebristas y los topólogos, pero ahora puede trascender especialidades, como comprobó el matemático Schweigert durante un congreso: «Es sorprendente. De repente podía conversar durante el desayuno con un científico computacional sobre sus investigaciones recientes, ¡y ambos empleábamos un lenguaje común!»

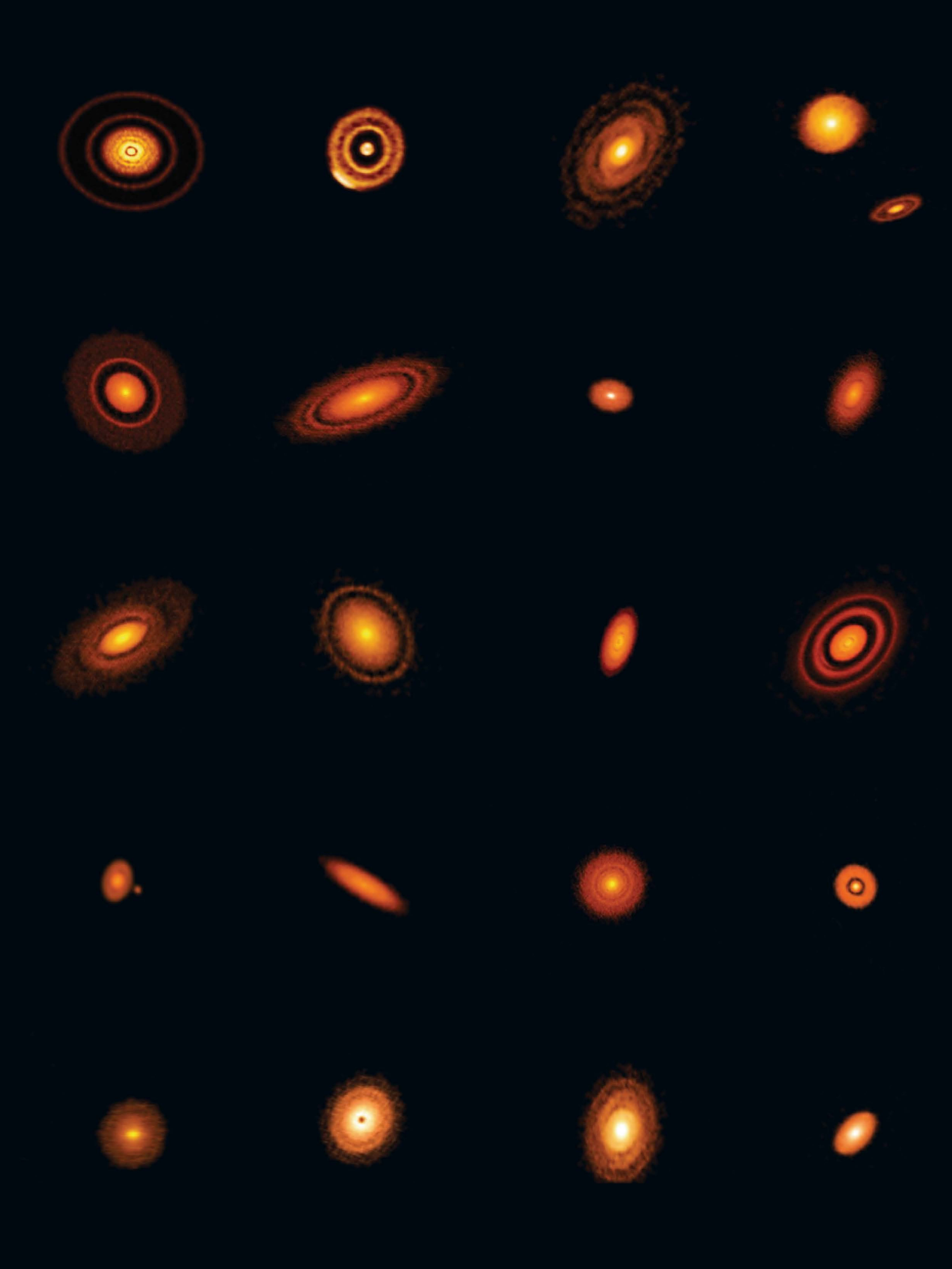
Para que suceda eso, los científicos deben estar dispuestos a aprender un formalismo abstracto que quizás les resulte ajeno, pero el esfuerzo puede merecer la pena, como constató Thorsten Altenkirch, informático en la Universidad de Nottingham: «Cuando oí hablar por primera vez de las categorías superiores, fruncí el ceño y pensé "¡vaya locura!". Pero resulta que era justo lo que necesitábamos», rememora. En algunas áreas de la informática, esta abstracta teoría se ha vuelto imprescindible. «Uno puede aprender la teoría de categorías o inventarla de nuevo», concluye Altenkirch, pero acabará apareciendo de un modo u otro. IyC

PARA SABER MÁS

When is one thing equal to some other thing? Barry Mazur en *Proof and other dilemmas: Mathematics and philosophy*, dirigido por Bonnie Gold y Roger A. Simons. Mathematical Association of America, 2008.
From a geometrical point of view: A study of the history and philosophy of category theory. Jean-Pierre Marquis. Springer, 2009.
Physics, topology, logic and computation: A Rosetta stone. John C. Baez y Mike Stay en *New structures for physics*, dirigido por Bob Coecke. Springer, 2010.
Category theory for the sciences. David I. Spivak. MIT Press, 2014.
What is applied category theory? Tai-Danae Bradley, octubre de 2018. Disponible en **arxiv.org/abs/1809**.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un instrumento matemático universal: los invariantes. Anne Quéguiner-Mathieu en *IyC*, abril de 2003.



ASTRONOMÍA

Ha nacido un planeta

Las imágenes de alta resolución de los remolinos de polvo que quedan tras formarse las estrellas revelan la presencia de planetas ocultos y detalles sobre cómo evolucionan los sistemas solares

Meredith A. MacGregor



LOS DISCOS PROTOPLANETARIOS fotografiados por el telescopio ALMA desvelan la formación de sistemas solares incipientes. Estos círculos giratorios de gas y polvo son los restos que dejan las estrellas al nacer y aportan los ingredientes necesarios para crear planetas.



Meredith A. MacGregor es profesora en la Universidad de Colorado en Boulder, donde estudia la formación y habitabilidad de sistemas planetarios. También es copresidenta del Consejo Directivo del Grupo de Interés en Ciencia de Infrarrojos de la NASA.

La semana en que comencé el doctorado, se anunciaron los primeros proyectos científicos del Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA), un nuevo telescopio situado en Chile. Este revolucionario instrumento está formado por decenas de antenas de radio que trabajan de forma conjunta para generar imágenes tan detalladas como las de un único telescopio de 16 kilómetros de ancho. Gracias a esta increíble resolución, las observaciones de ALMA en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas son más profundas y lejanas que las de cualquier otro telescopio anterior.

No desaproveché la ocasión de unirme a uno de esos proyectos iniciales, el estudio de un disco de polvo y escombros alrededor de la estrella cercana AU Mic. Los científicos nunca habían visto con tanto detalle este tipo de objetos antes de la construcción de ALMA. Puede que el polvo y los escombros no parezcan muy emocionantes, pero son la materia prima de la que están hechos los planetas, y este observatorio nos brindaba la oportunidad de presenciar el proceso de formación planetaria en acción.

Los datos tardaron un año en llegar. Gran parte de la astronomía moderna se hace a distancia: en vez de pasar largas noches en un observatorio remoto, solo tuvimos que enviar una secuencia de comandos informáticos para decirle al telescopio dónde y cuándo apuntar, y después aguardar pacientemente (o más bien con impaciencia) a que se agendaran y completaran nuestras observaciones. Aún recuerdo la expectación, las mariposas en el estómago mientras esperaba a que se descargaran los datos y, cuando por fin estuvo todo listo, el asombro al ver aparecer la imagen en la pantalla de mi ordenador: una mancha de luz larga y delgada con tres puntos brillantes, uno en el centro y dos en los bordes, uno a cada lado.

Lo que vislumbrábamos era un sistema solar en crecimiento. El punto central correspondía a la estrella, que ahora sabemos que fulgura y envía al espacio ráfagas de partículas de alta energía. Los otros dos puntos brillantes marcaban los bordes de un disco de escombros que envuelve la estrella central, semejante al cinturón de Kuiper que orbita en torno a nuestro Sol [*véase* «El sistema solar más allá de Neptuno», por Michael D. Lemonick; Investigación y Ciencia, enero de 2015]. Creemos que esa banda está compuesta por los restos que dejó la formación de planetas alrededor de AU Mic, una joven estrella enana de tipo M situada a unos 32 años luz de la Tierra. Hace poco, otros científicos han descubierto dos planetas en ese sistema, con masas similares a las de Júpiter y Saturno, y que orbitan bastante cerca de su estrella. Ahora disponemos de una oportunidad única para observar la evolución del material del disco y sus interacciones con los planetas recién formados.

Desde la obtención de esa imagen, las posibilidades de ALMA han seguido aumentando: la red cuenta hoy con nuevas antenas y una mayor resolución, y cubre un intervalo más amplio de longitudes de onda. Entretanto, los estudios sobre los discos que rodean las estrellas y la génesis planetaria se han multiplicado. ALMA ha realizado cientos de fotografías que ofrecen una nueva visión sobre cómo se forman tales sistemas y desvelan un tesoro de planetas ocultos que no podríamos haber detectado de otro modo.

DISCOS CIRCUNESTELARES

Las estrellas se forman a partir de vastas regiones de gas y polvo conocidas como nubes moleculares. La densidad típica del espacio vacío es de tan solo un átomo por centímetro cúbico, pero las partes más espesas de las nubes moleculares pueden alcanzar densidades entre 10.000 y un millón de veces más altas. Cuando esas zonas, o «núcleos», se vuelven lo bastante densas, se derrumban bajo su propia gravedad y dan lugar a estrellas. Al mismo tiempo, la rotación inicial del núcleo que colapsa y la conservación del momento angular crean un disco alrededor de

EN SÍNTESIS

El telescopio ALMA, inaugurado en 2011, concedió a los astrónomos la primera oportunidad de observar con detalle los discos de gas y polvo que rodean las estrellas.

Tales discos circunestelares ayudan a comprender la formación y evolución de los sistemas solares distantes, y su estructura puede delatar la presencia de planetas imposibles de detectar de otro modo.

Los telescopios que entrarán en funcionamiento en los próximos años nos permitirán profundizar en el estudio de los discos circunestelares y tal vez observar de manera directa los planetas que albergan.

PÁGINAS ANTERIORES: ALMA (ESO, NAOJ Y NRAO), S. ANDREWS ET AL. Y N. LIRA

la estrella recién nacida. Los astrónomos llaman discos circunestelares a esas acumulaciones de polvo y gas.

Cuando las estrellas son aún muy jóvenes (con solo unos pocos millones de años), sus discos circunestelares son relativamente grandes, y a menudo contienen entre el 1 y el 10 por ciento de la masa de la estrella central. Para una estrella como el Sol, eso supone un disco con unas 100 veces la masa de Júpiter. Tales discos jóvenes y masivos son «protoplanetarios» porque pensamos que es en ellos donde se forman los planetas. Las rocas, los metales y el hielo del disco se condensan en semillas planetarias, las cuales comienzan a chocar y a adherirse, y van creciendo hasta adquirir la gravedad suficiente como para atraer más material a través de un proceso denominado acreción. Estos protoplanetas orbitan en el interior del disco y continúan acumulando material, generando huecos como en una especie de «comecocos» planetario. Casi todas las estrellas con edades inferiores a unos pocos millones de años están rodeadas de discos que seguramente albergan una plétora de nuevos sistemas planetarios.


EN LAS ALTURAS DEL DESIERTO CHILENO DE ATACAMA, el observatorio ALMA combina decenas de antenas para captar imágenes de sistemas planetarios distantes.

La fase de disco protoplanetario dura varios millones de años. Una vez concluida, la mayoría del gas y el polvo del disco circunestelar inicial se ha disipado. Aunque el mecanismo y la escala temporal del proceso son objeto de investigación activa, creemos que buena parte de ese material, o bien migra hacia el interior y cae sobre la estrella central, o es expulsado por fuertes vientos estelares. Al cabo de unos 10 millones de años, lo único que queda es una estrella madura rodeada de un nuevo sistema planetario y un disco de asteroides y cometas remanentes. La masa total de esos restos es baja, probablemente inferior al 10 por ciento de la masa de la Tierra. Pese a que tales «discos de escombros» todavía pueden contener suficiente masa para crear pequeños planetas terrestres o cuerpos similares a Plutón, podemos considerarlos el registro fósil de la formación planetaria. Su estructura responde a las interacciones gravitatorias con los planetas recién nacidos, y su composición nos da pistas sobre el material que se incorporó originalmente a esos mundos.

Los discos de escombros se descubrieron tras el lanzamiento en 1983 del Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS), la primera sonda que exploró todo el cielo en longitudes de onda infrarrojas (de 12 a 100 micras; el grosor de un pelo humano es de unas 75 micras). Podemos pensar en la radiación infrarroja en términos de calor. Cuando el IRAS examinó el cielo en el infrarrojo, los astrónomos vieron que muchas estrellas brillaban más de lo esperado. ¿Por qué? Se propuso que era debido al polvo: si esas estrellas estuvieran rodeadas de discos de polvo, los granos se calentarían y emitirían radiación térmica en el infrarrojo. Esa inferencia dio lugar a una nueva área de investigación y, de hecho, los cuatro primeros discos de escombros que halló el IRAS (en torno a las estrellas Vega, Beta Pictoris, Epsilon Eridani y Fomalhaut) aún son objeto de estudio y análisis.

Los astrónomos han buscado esos puntos brillantes con telescopios infrarrojos y han confirmado que al menos entre el 20 y el 25 por ciento de las estrellas presentan discos de escombros. A tenor de nuestras ideas sobre la formación de sistemas planetarios, parecería lógico concluir que cualquier estrella debe estar rodeada de material remanente; al fin y al cabo, las estadísticas de la misión Kepler sugieren que todas las estrellas de la galaxia poseen al menos un planeta. En realidad, es probable que los discos de escombros sean más comunes de lo que pensamos: hasta nuestro sistema solar tiene más de uno —el cinturón de asteroides y el cinturón de Kuiper—, a pesar de que contiene poco polvo en comparación con los sistemas que hemos fotografiado en torno a otras estrellas. De hecho, los estudios infrarrojos más profundos realizados hasta la fecha solo han identificado discos cuya masa de polvo es aproximadamente un orden de magnitud superior a la observada en el sistema solar. ¿Significa eso que nuestro hogar cósmico constituye una excepción? Aún no estamos seguros. Hemos estudiado los discos más masivos y extremos, pero probablemente quedan por descubrir muchos otros discos de masa baja que nos ayudarán a situar nuestro propio sistema planetario en su contexto.

Si bien los astrónomos comenzaron a deducir la presencia de discos de polvo desde las primeras observaciones infrarrojas de los ochenta, ignoraban qué aspecto tenían. Antes de los avances tecnológicos que experimentaron los telescopios en las décadas de 1990 y 2000, se había resuelto un único sistema estelar: Beta Pictoris. El telescopio espacial Hubble empleó la coronografía (una técnica que consiste en bloquear la luz de la estrella central para poder ver los objetos adyacentes más tenues) a fin de observar la luz dispersada por los pequeños granos de polvo de los discos circunestelares. Aunque al principio muchas de las imágenes eran borrosas, aportaron los primeros indicios de que los discos poseen estructuras complejas y extensas. En el caso de Beta Pictoris, las imágenes del Hubble mostraron una deformación en las regiones internas del disco de escombros, que los astrónomos interpretaron como un posible planeta oculto. Más adelante se confirmaría la existencia de ese mundo incipiente mediante la observación directa.

UN NUEVO TELESCOPIO

La longitud de onda de la luz reflejada por el polvo se corresponde aproximadamente con el tamaño de los granos: la radia-

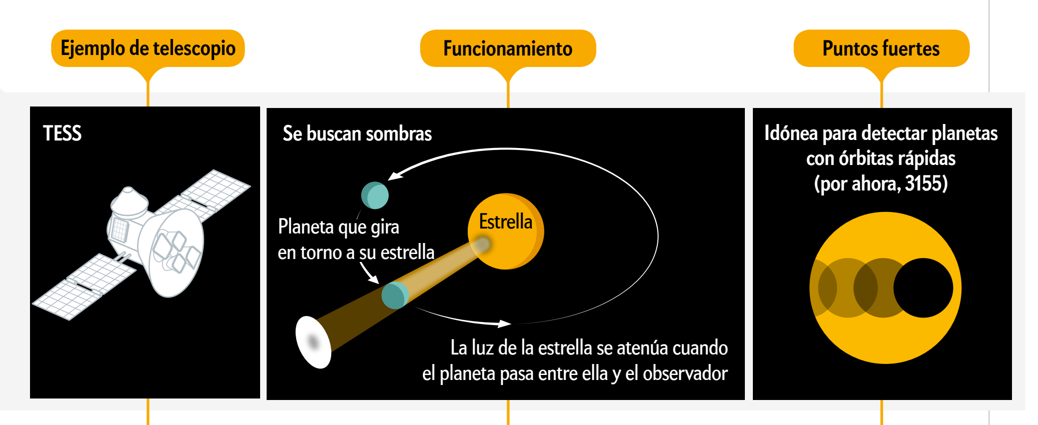
CLEM Y ADRI BACRI-NORMIER (WINGSFORSCIENCE.COM) Y ESO

En busca de nuevos mundos

Los astrónomos creen que casi todas las estrellas de la galaxia tienen planetas a su alrededor, aunque aún no podemos descubrir la mayoría de ellos. Cada uno de los métodos empleados para detectar planetas presenta sus puntos fuertes y débiles, y está sesgado hacia determinados tipos de mundos. Los planetas de un tamaño similar a la Tierra y que describen largas órbitas alrededor de sus soles son especialmente difíciles de encontrar, así que se conocen muy pocos de ellos.

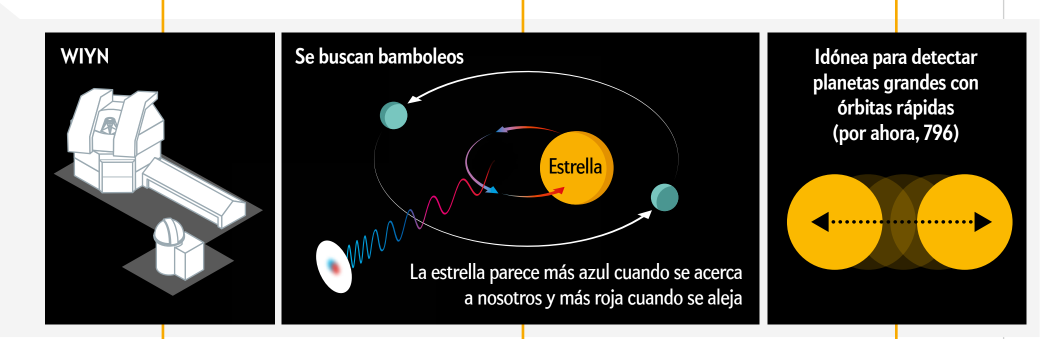
TRÁNSITOS

Cada vez que un planeta pasa por delante de su estrella anfitriona, la luz de esta se atenúa (siempre que el sistema esté alineado con la Tierra). El estudio de estas sombras periódicas puede revelar no solo la existencia de un planeta, sino también su diámetro y la longitud de su órbita.



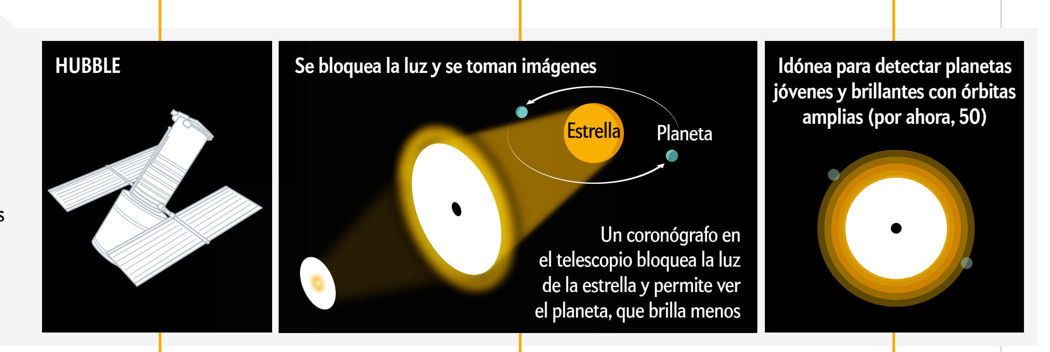
VELOCIDAD RADIAL

La atracción gravitatoria de un planeta induce movimientos reveladores en su estrella. Para medirlos, los astrónomos buscan los cambios de frecuencia que sufre la luz de la estrella cuando esta se acerca (las ondas se agrupan y se produce un «corrimiento al azul») o se aleja de nosotros (las ondas se separan y vemos un «corrimiento al rojo»).



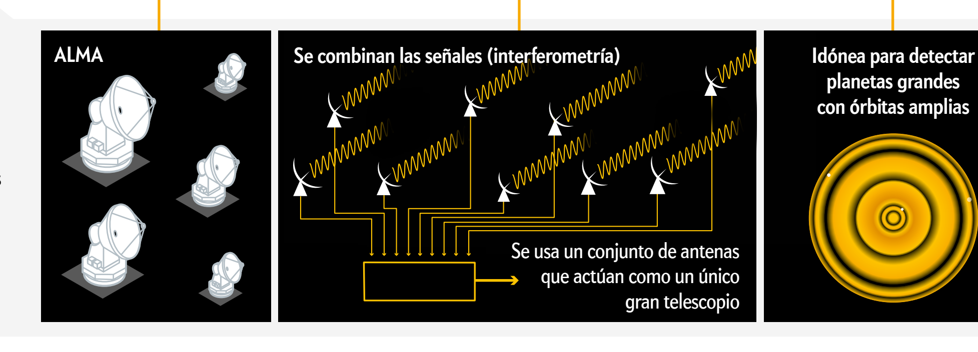
OBSERVACIÓN DIRECTA

A veces, si un planeta es lo bastante brillante y orbita lejos de su estrella, los telescopios logran verlo de forma directa. Por lo general, hay que bloquear la luz de la estrella (mediante una técnica llamada coronografía) para poder detectar la luz mucho más tenue de su planeta. Sin embargo, la gran mayoría de los planetas no pueden visualizarse con los instrumentos actuales.



DISCOS CIRCUNESTELARES

Los huecos, aglomeraciones y deformaciones de los discos de polvo y gas que rodean las estrellas pueden revelar planetas ocultos. Los discos son visibles en longitudes de onda largas, las cuales requerirían telescopios enormes. Los astrónomos combinan muchos telescopios más pequeños y muy separados para crear un observatorio virtual tan ancho como la distancia entre ellos.



NIGEL HAWTIN

ción visible e infrarroja cercana proviene de partículas de polvo pequeñas, de decenas de micras, mientras que las imágenes tomadas en longitudes de onda del infrarrojo lejano y milimétricas son sensibles a granos más grandes, similares a los de la arena. Pensamos que estos últimos reflejan mejor la estructura de los discos circunestelares. En el interior de un disco se producen continuas colisiones, en las que grandes cometas y asteroides chocan entre sí y quedan reducidos a granos de polvo cada vez más pequeños. Los objetos más masivos del disco se denominan planetesimales, y su ubicación depende de las interacciones con otros planetas del sistema. Si localizamos estos planetesimales, podremos inferir la presencia de planetas ocultos, aun en el caso de que nunca logremos observarlos de forma directa.

Los granos de polvo más pequeños se mueven de un lado a otro a causa de sus interacciones con el gas interestelar o son expulsados por los vientos y la radiación de la propia estrella. Pero los granos con un tamaño parecido al de la arena se ven menos afectados por tales fuerzas, así que nos ofrecen una gran oportunidad para desvelar la estructura del disco y los planetas ocultos a partir de sus efectos gravitatorios.

Por lo tanto, pretendemos trabajar en longitudes de onda largas a fin de estudiar la estructura del disco y buscar indicios de planetas ocultos. Parece sencillo, pero, naturalmente, hay una pega. La resolución de un telescopio equivale a la longitud de onda observada dividida por el diámetro del instrumento. En consecuencia, si pasamos de longitudes de onda visibles a milimétricas, necesitaremos aumentar drásticamente el tamaño del telescopio para obtener el mismo poder de resolución. El Hubble tiene un diámetro de 2,4 metros, lo que le permite observar con una resolución de 0,13 segundos de arco en longitudes de onda de una micra; si quisiéramos alcanzar el mismo nivel de detalle con longitudes de onda de un milímetro, habría que multiplicar el diámetro del telescopio por un factor 1000, hasta superar los dos kilómetros. Como no es posible construir un aparato tan grande, debemos recurrir a la interferometría, una técnica que combina las señales de muchos telescopios más pequeños repartidos a lo largo de dos kilómetros para lograr la misma resolución que un único telescopio de esas dimensiones.

ALMA, que captó sus primeras imágenes en 2011, sigue siendo el interferómetro más potente del mundo. Situado a unos cinco kilómetros de altitud, en el desierto chileno de Atacama, el observatorio cuenta con 66 antenas que pueden reubicarse para alcanzar líneas de base —la distancia entre dos antenas— de entre 150 metros y 16 kilómetros. Para quien conozca el área de Washington D.C., en su configuración más compacta ALMA cabría por completo en la Elipse (una gran explanada cercana a la Casa Blanca), mientras que en la más extensa llenaría la Interestatal 495, la autopista que rodea la capital estadounidense. Gracias a sus avances en sensibilidad y resolución, hoy podemos observar objetos más tenues con un detalle sin precedentes. No es exagerado afirmar que ALMA ha revolucionado nuestra concepción de los discos circunestelares.

En 2014, ALMA obtuvo una de sus primeras imágenes icónicas de un disco circunestelar. La fotografía de HL Tau, una estrella joven que probablemente tenga menos de 100.000 años, reveló que su disco no era continuo, sino que presentaba múltiples anillos y huecos. Dada la escasa edad del sistema, si tales huecos responden a la presencia de planetas incipientes, la formación planetaria debe comenzar antes de lo que pensábamos. En 2018 llegó otro hallazgo notable: el proyecto DSHARP estudió veinte discos protoplanetarios con alta resolución y descubrió que todos ellos mostraban anillos y huecos, y algunos incluso una estructura espiral. Parece que estos elementos no son exclusivos de HL Tau, sino que se encuentran de forma generalizada en los discos circunestelares jóvenes.

DETECCIÓN DE PLANETAS

Aparte de arrojar luz sobre el proceso de formación planetaria, el estudio de los discos también permite detectar mundos que seríamos incapaces de hallar de otro modo.

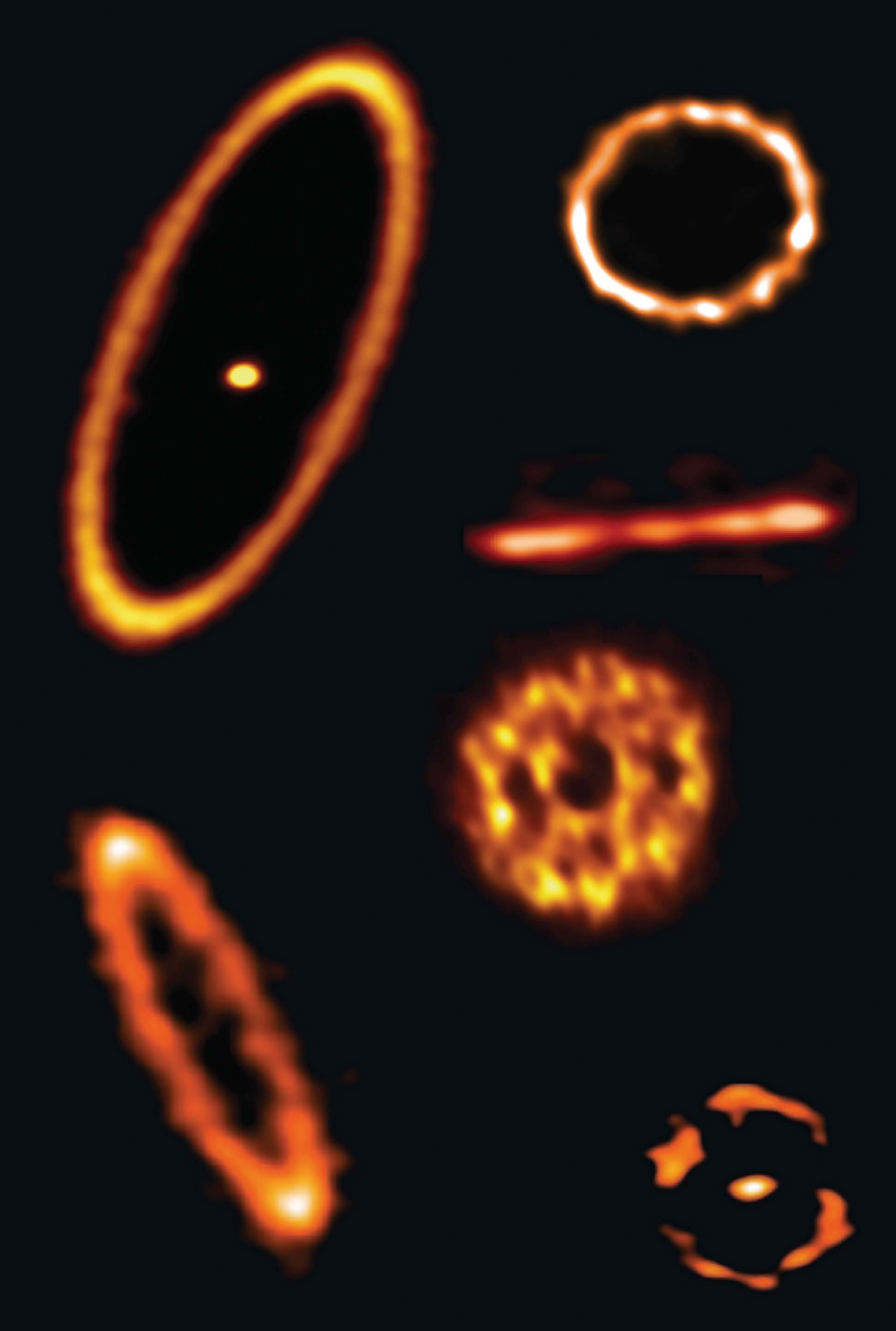
Ya hemos descubierto miles de exoplanetas gracias a telescopios espaciales como Kepler y TESS (el Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito), y a diversas investigaciones realizadas con observatorios terrestres. La mayoría de esos mundos son más masivos o están más cerca de su estrella que los del sistema solar, lo cual no implica que ese tipo de planetas sean más comunes: simplemente nos resultan más fáciles de encontrar. Los dos principales métodos para detectar exoplanetas son el del tránsito, que trata de identificar el oscurecimiento periódico de una estrella cuando un planeta pasa por delante de ella, y el de la velocidad radial, que se centra en los leves cambios de velocidad que experimenta la estrella como resultado de la atracción gravitatoria del planeta.

Pero en ambos casos hay que observar varias órbitas para confirmar una detección, por lo que estas técnicas resultan más adecuadas para hallar mundos grandes con órbitas cortas, y los astrónomos que las emplean podrían estar dejando escapar muchos planetas. Por ejemplo, Neptuno tiene un periodo orbital de unos 165 años, de modo que si estudiáramos el sistema solar desde otra estrella, tardaríamos mucho en verlo transitar una sola vez por delante del Sol. Los pocos planetas conocidos que se encuentran tan lejos de su estrella anfitriona se han descubierto por observación directa, bloqueando la luz de la estrella con un coronógrafo. No obstante, este método también presenta sesgos observacionales, puesto que favorece la detección de sistemas jóvenes cuyos planetas todavía conservan una gran cantidad de calor procedente de su formación.

Para poner la arquitectura del sistema solar en su contexto, debemos ser capaces de hallar planetas gigantes que orbiten a grandes distancias de sus estrellas en sistemas viejos. Y eso es factible si usamos las estructuras de los discos circunestelares resueltos por ALMA, que proporcionan una potente estrategia complementaria para detectar exoplanetas.

En efecto, podemos descubrir mundos similares a Neptuno estudiando las deformaciones, aglomeraciones y demás asimetrías que producen los planetas en sus discos. En nuestro sistema solar, el cinturón de Kuiper es bastante estrecho debido a la influencia gravitatoria de Neptuno. Pensamos que este planeta se formó más cerca del Sol y luego migró al exterior, arrastrando consigo gran parte del material remanente para crear el actual cinturón de Kuiper [*véase* «Migración planetaria», por Renu Malhotra; Investigación y Ciencia, noviembre de 1999]. Así pues, si observamos estructuras parecidas en discos de escombros extrasolares, podremos inferir la presencia de planetas ocultos semejantes a Neptuno.

También podemos aprender más acerca de los planetas que ya conocemos si examinamos los discos donde se alojan. En el sistema de la estrella HR 8799, hemos observado de forma directa cuatro planetas gigantes que orbitan entre discos análogos a nuestro cinturón de asteroides y al cinturón de Kuiper. La interferometría milimétrica nos permite resolver la estructura del segundo de esos discos (el más exterior) y determinar la posición de su borde interno. Si suponemos que el planeta más externo del sistema es el responsable de tallar el disco, podemos



TRAS FORMARSE LOS PLANETAS, los discos protoplanetarios devienen discos de escombros como los que muestran estas imágenes de ALMA. Estas bandas de material remanente se asemejan al cinturón de Kuiper de nuestro sistema solar.

ALMA (ESO, NAOJ Y NRAO)

emplear dicha posición para acotar la masa del planeta, que resulta ser unas seis veces mayor que la de Júpiter. Quizás no parezca un gran logro, pero este valor es mucho más preciso que nuestra mejor estimación previa, basada en modelos teóricos sobre cómo se enfrían y oscurecen los planetas con el tiempo. La estructura del disco ofrece una manera independiente de verificar esos modelos.

Los jóvenes discos protoplanetarios observados por ALMA exhiben un amplio abanico de estructuras detalladas, y en casi todos hallamos anillos y huecos. Si estos se deben a la presencia de planetas, podemos asumir que existe una gran población oculta de gigantes helados. Sin embargo, establecer un vínculo directo entre la estructura de los sistemas jóvenes y los planetas supone un reto, porque hay otros efectos que dificultan la modelización. Los discos de escombros, más antiguos y evolucionados, son más fáciles de interpretar, pero por el momento muy pocos de ellos muestran varios anillos. Recientemente, hemos descubierto un nuevo hueco en el disco de escombros de HD 15115; dicho espacio se encuentra más lejos de su estrella que Plutón del Sol y podría corresponder a un gigante helado con una masa algo menor que la de Saturno, de acuerdo con los modelos dinámicos. Sospecho que a medida que obtengamos más imágenes profundas y de alta resolución de estos sistemas evolucionados, aparecerán nuevos elementos inducidos por planetas.

Aparte de estudiar la estructura de los discos circunestelares, también podemos preguntarnos de qué están hechos. Dado que los discos constituyen tanto la fuente de material como el registro fósil de la formación planetaria, su composición está íntimamente ligada a la composición e historia evolutiva de los mundos que albergan. Muchas moléculas comunes emiten radiación en longitudes de onda milimétricas debido a la flexión y extensión de sus enlaces moleculares. Los científicos han detectado decenas de moléculas orgánicas e inorgánicas (monóxido de carbono, formaldehído, metanol y amoniaco, entre muchas otras) en las grandes reservas de gas que poseen los discos protoplanetarios [*véase* «El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida», por Rafael Bachiller; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

Nuestra investigación también ha destapado un nuevo misterio: tradicionalmente se ha supuesto que los discos de escombros poseían poco gas, porque sus reservas iniciales debían disiparse en unos pocos millones de años. ALMA ha revelado que algunos discos de escombros contienen dióxido de carbono gaseoso, pero interpretamos que lo obtienen a través de impactos con cometas, en los que estos astros quedan reducidos a pequeños granos de polvo y liberan sus hielos en forma de gas. Sin embargo, algunos sistemas ponen en duda esta teoría, porque presentan tanto gas que las colisiones con los cometas tendrían que ser exageradamente frecuentes. Y eso plantea una pregunta: ¿es posible que el gas primordial permanezca en esos discos durante decenas de millones de años? Por el momento, desconocemos la respuesta.

UN FUTURO EN VARIAS LONGITUDES DE ONDA

Ha sido emocionante crecer como científica al tiempo que se desarrollaba el campo de la formación planetaria. Comencé mi doctorado cuando ALMA miraba al cielo por primera vez, y ahora me incorporo a mi primer puesto docente mientras nos adentramos en el nuevo y emocionante futuro de la astronomía en múltiples longitudes de onda. ALMA ha revolucionado nuestra concepción de los discos circunestelares al revelar complejidades en su estructura y composición química que hace unas décadas tan solo podríamos haber adivinado; pero este observatorio no tiene todas las respuestas. Todos los discos de escombros analizados en este artículo son análogos al cinturón de Kuiper: fríos anillos de polvo situados en las regiones exteriores de sus sistemas solares. Los astrónomos aún no han logrado fotografiar discos equivalentes al cinturón de asteroides, y solo podemos detectarlos a partir de su exceso de radiación infrarroja, como hacíamos con el IRAS en los viejos tiempos.

Para observar la parte interna de los sistemas extrasolares, necesitamos usar longitudes de onda más cortas, que sean sensibles al polvo más caliente. Esperamos que el telescopio espacial James Webb (JWST), cuyo lanzamiento está previsto para 2021, obtenga la primera imagen de uno de esos discos análogos al cinturón de asteroides. Además, las longitudes de onda en las que trabajará el JWST permitirán identificar las emisiones procedentes de silicatos (minerales como el olivino y los piroxenos, que también existen en la Tierra) y restringir la composición mineral de los granos del disco [*véase* «El próximo observatorio espacial», por Robert Irion; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010].

Mirando a un futuro aún más lejano, se está construyendo la próxima generación de «telescopios extremadamente grandes», que recibirán su primera luz a mediados o finales de la década de 2020. Con diámetros de más de 24 metros, estos instrumentos serán cinco veces más grandes que cualquier telescopio terrestre actual, y quizás sean capaces de fotografiar algunos de los planetas que hoy solo podemos inferir a partir de los discos observados por ALMA.

En estos momentos se está preparando el Informe Decenal de Astronomía y Astrofísica, que trata de establecer prioridades en la disciplina en cuanto a la futura financiación de proyectos. Se están valorando cuatro misiones de la NASA que podrían conllevar grandes avances en planetología a partir de la década de 2030. El telescopio espacial Origins, un observatorio infrarrojo refrigerado criogénicamente, podría estudiar cómo llega el agua de las regiones de formación estelar a los discos circunestelares o proporcionar estadísticas sobre las poblaciones de discos de masa baja, entre otras muchas aplicaciones. Por su parte, el Gran Explorador Ultravioleta, Óptico e Infrarrojo y el Observatorio de Exoplanetas Habitables son misiones de observación directa que podrían descubrir y caracterizar muchos exoplanetas, entre ellos algunos similares a la Tierra.

Independientemente de qué proyecto acabe siendo seleccionado, hay algo indudable, y es que nuestra manera de entender el sistema solar, su formación y el lugar que ocupa en el universo de sistemas planetarios cambia cada día. La sensación de tener mariposas en el estómago mientras llegan los resultados se repite una y otra vez, con cada nueva observación. IyC

PARA SABER MÁS

Millimeter emission structure in the first ALMA image of the AU Mic debris disk. Meredith A. MacGregor et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 762, n.º 2, art. L21, enero de 2013.
The 2014 ALMA long baseline campaign: First results from high angular resolution observations toward the HL Tau region. Colaboración ALMA et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 808, n.º 1, art. L3, julio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

A la caza de gigantes gaseosos. Lee Billings en *IyC*, octubre de 2015.
Nacido del caos. Konstantin Batygin, Gregory P. Laughlin y Alessandro Morbidelli en *IyC*, julio de 2016.
Sombras de otros mundos. Joshua N. Winn en *IyC*, mayo de 2018.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



El vuelo oceánico de las arañas

Algunas arañas aprovechan las fuerzas electrostáticas para elevarse en el aire. El fenómeno, documentado por el propio Darwin, puede dar lugar a vuelos de distancias kilométricas

Cuando en medio del océano nace una isla volcánica, los primeros artrópodos terrestres en colonizarla suelen ser las arañas. A esos lugares llegan gracias al impulso de los vientos. Pero ¿cómo alzan el vuelo? Hace tiempo que los investigadores consideran que en este curioso fenómeno intervienen dos mecanismos físicos: las fuerzas aerodinámicas del aire y las electrostáticas causadas por la atmósfera. En los últimos años, varios trabajos han clarificado sus papeles respectivos y, en concreto, han subrayado la contribución esencial de la electrostática.

Para entender mejor lo que sucede, sumerjámonos en los diarios de Charles Darwin, quien fue testigo del fenómeno durante su largo viaje a bordo del *Beagle*, entre 1831 y 1836. El ilustre naturalista narra que, en un día calmo y claro, cuando la costa más cercana (la de Argentina) se hallaba a un centenar de kilómetros, la nave fue de repente invadida desde el aire por arañas de entre dos y siete milímetros de tamaño.

Darwin se fijó especialmente en la manera en que los animales iniciaban el

ALGUNAS ARAÑAS pueden alzar el vuelo tras situarse en la punta de una hoja y proyectar hilos de seda de varios metros de largo. En ocasiones, sus travesías dan lugar a «lluvias» de arácnidos.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

vuelo: las arañas llegaban a la cima de algún objeto, levantaban el abdomen hacia el cielo, lanzaban hilos de seda de unos dos o tres metros de largo y, entonces, despegaban según la horizontal con una rapidez más que notable.

Darwin anotó que una brisa leve y la convección del aire podían explicar que el hilo de seda se elevase. También interpretó que el despliegue en abanico de los hilos tejidos por una misma araña se debía a la repulsión electrostática. Y estaba en lo cierto: había identificado claramente los dos mecanismos físicos implicados.

En efecto, sin viento no hay viaje posible. Por lo general, el despegue de estos animales tiene lugar con una brisa leve, un viento de no más de tres metros por segundo. A causa de las turbulencias atmosféricas, tales brisas van acompañadas de corrientes ascendentes que, al nivel del suelo, son del orden de una fracción de metro por segundo.

Si se tiene en cuenta el diámetro de los hilos, inferior a un micrómetro (cien veces menos que un cabello humano), el número de Reynolds, que expresa el cociente entre las fuerzas de empuje debidas al desplazamiento de las masas de aire y las debidas a la viscosidad, es del orden de 0,01. Por tanto, predominan estas últimas. La fuerza correspondiente es proporcional a la velocidad del hilo relativa al aire y, de manera aproximada, a la longitud del hilo. Con un hilo de un metro y una velocidad ascendente del aire de 0,1 metros por segundo, la fuerza resulta ser del orden de un micronewton; esto es, equivalente al peso de 0,1 miligramos. Por tanto, bastan unas decenas de hilos para elevar las arañas más ligeras, cuya masa no supera los 5 miligramos o menos.

Por supuesto, a mayor distancia del suelo los vientos ascendentes serán algo más intensos, y una velocidad de pocos metros por segundo bastará para que una araña de varias decenas de miligramos permanezca en al aire sin caer. Pero ¿cómo se explica el despegue? ¿Y por qué las arañas de Darwin remontaban según la horizontal y más rápidas que la brisa ambiente? ¿No parece paradójico este fenómeno?

Aire eléctrico

La respuesta a tales preguntas reside en la electrostática. En efecto, en los fenómenos atmosféricos interviene un campo eléctrico que nos baña de manera permanente. El rayo constituye una de sus manifestaciones más espectaculares, pero también cuando el tiempo está calmo y claro reina un campo eléctrico. Sobre un terreno arado, llano y horizontal, su intensidad asciende a unos 120 voltios por metro.

Sin embargo, ese es solo un valor medio, y la presencia de una estructura conductora puede intensificar considerablemente dicho campo debido al efecto punta. Así ocurre con los árboles: dado su gran contenido en agua y electrolitos, son lo bastante conductores para hallarse al mismo potencial eléctrico que el suelo. Ello implica una acumulación de cargas en los extremos de las ramas y las hojas, las cuales pueden llegar a generar un campo eléctrico muy intenso (*véase el recuadro* «Electricidad atmosférica»). Así pues, a 10 metros por encima del follaje de un árbol aislado y de 35 metros de alto, se miden campos de unos 2 kilovoltios por metro. Y a la altura del follaje, la intensidad puede alcanzar las decenas de kilovoltios por metro.

Por tanto, el campo electrostático no es en absoluto ajeno a los entornos forestales, hábitat natural de las arañas. Pero ¿adquieren a su vez carga eléctrica los arácnidos y sus hilos de seda? Podemos hacer una primera estimación de la carga de los hilos observando su despliegue en abanico y considerando el efecto de dos fuerzas electrostáticas: por un lado, la fuerza ascendente debida al campo eléctrico atmosférico, proporcional a la carga del hilo; y por otro, la repulsión entre hilos, proporcional al cuadrado de esa misma carga (el producto de la carga de dos hilos).

Cuando la carga aumenta, la repulsión entre hilos crece más rápido que la fuerza que los alinea en paralelo, por lo que el abanico que forman tiende a abrirse más. Con un ángulo de un radián (57 grados) para un abanico de cinco hilos de un metro de largo y sometidos a un campo de 120 voltios por metro, la carga total asciende a un nanoculombio.

Campos intensificados

¿Asegura esa carga la suspensión en el aire de la araña? El campo eléctrico ejerce sobre ella una fuerza de 0,1 micronewtons; es decir, el peso de una masa de 0,01 miligramos. Con cien hilos, se llega a los 0,2 miligramos, siempre para un centenar de voltios por metro.

Ahora bien, justo encima de un árbol, el campo eléctrico alcanza entre 10 y 100 veces ese valor. Por tanto, puede elevar sin dificultad arañas de varias decenas de miligramos si estas producen unas decenas de hilos de algunos metros de longitud. En tal caso, la carga de los hilos puede superar los 10 nanoculombios, un valor considerable para un animal tan pequeño. Pero las propiedades eléctricas de la seda (capacidad, resistencia) indican que esa carga se alcanza en unos pocos segundos (un tiempo compatible con las observaciones) bajo corrientes de algunos

ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA

LA IONOSFERA, una capa atmosférica situada a decenas de kilómetros de altitud, está dotada de carga positiva. Su potencial eléctrico con respecto al suelo es de entre 100 y 300 kilovoltios. Ello da lugar a un campo eléctrico que, en las cercanías del suelo, toma valores de aproximadamente un centenar de voltios por metro. Pero la presencia de ciertos objetos, como los árboles, puede introducir fuertes distorsiones, sobre todo en las regiones más puntiagudas del objeto. Gracias a esos campos eléctricos, relativamente intensos, y a las densidades de carga que se concentran cerca de las superficies aguzadas, las arañas pueden despegar con facilidad. Después, ayudadas por el viento, pueden llegar a alcanzar altitudes de hasta varios kilómetros.

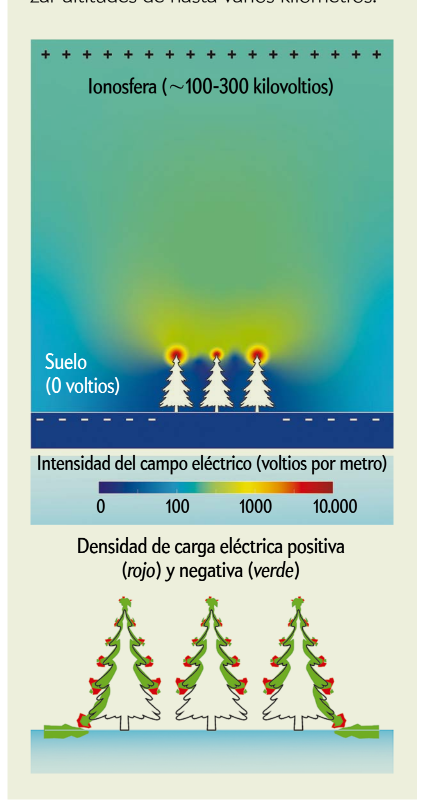
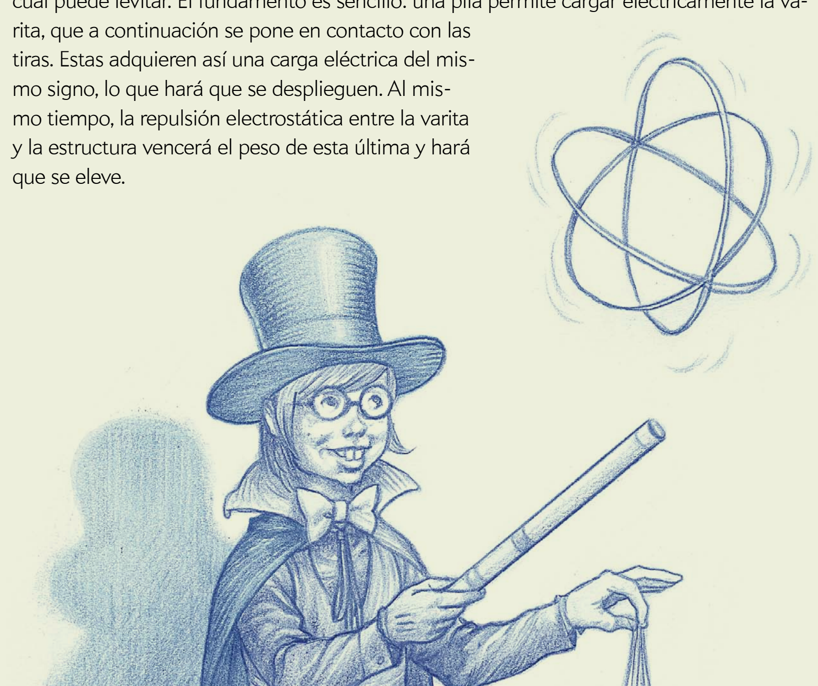


GRÁFICO DE D. CLARKE ET AL., *JOURNAL OF COMPARATIVE PHYSIOLOGY A*, VOL. 203, PÁGS. 737-748, 2017



LEVITACIÓN ELECTROSTÁTICA

LAS MISMAS FUERZAS ELECTROSTÁTICAS que permiten que las arañas remonten el vuelo pueden también hacer levitar objetos macroscópicos. Existe un juguete formado por una «varita mágica» y una estructura de tiras flexibles de un material ligero y conductor, la cual puede levitar. El fundamento es sencillo: una pila permite cargar eléctricamente la varita, que a continuación se pone en contacto con las tiras. Estas adquieren así una carga eléctrica del mismo signo, lo que hará que se desplieguen. Al mismo tiempo, la repulsión electrostática entre la varita y la estructura vencerá el peso de esta última y hará que se eleve.



nanoamperios y tensiones de decenas de voltios, valores que no representan peligro para el arácnido.

Volviendo a las observaciones de Darwin, un cálculo del campo eléctrico a bordo de un barco como el *Beagle* muestra que la presencia de partes verticales y altas, como el mástil, crea en la borda un campo eléctrico horizontal entre tres y cuatro veces más intenso que el ambiental; es decir, de varios centenares de voltios por metro. La fuerza electrostática correspondiente sería entonces considerable y también horizontal: de ahí la inesperada aceleración de las arañas al despegar.

¿Cómo cerciorarnos del papel que desempeña la electrostática? En principio, para ello habría que medir la carga transportada por las arañas, lo que se antoja ciertamente difícil. Por esa razón, en 2018 Erica Morley y Daniel Robert, de la Universidad de Bristol, decidieron «interrogar» a las arañas. Sus experimentos revelaron que, cuando aparece un campo eléctrico de intensidad suficiente, las arañas voladoras lanzan uno o varios hilos y levantan el abdomen. Y esta última postura solo la adoptan las que pretenden alzar el vuelo. En otras palabras: los animales son perfectamente sensibles al campo eléctrico y solo se aprestan a despegar si notan que este es suficiente. IyC

PARA SABER MÁS

Ballooning spiders: The case for electrostatic flight. Peter W. Gorham en **arxiv.org/abs/1309.4731**, septiembre de 2013.

The bee, the flower, and the electric field: Electric ecology and aerial electroreception. Dominic Clarke, Erica Morley y Daniel Robert en *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 203, págs. 737-748, junio de 2017.

Electric fields elicit ballooning in spiders. Erica Morley y Daniel Robert en *Current Biology*, vol. 28, págs. 2324-2330, julio de 2018.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático emérito de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Wallace, el «otro» descubridor de la evolución

Los viajes y las lecturas científicas le llevaron a las mismas ideas que Darwin sobre la selección natural

José Manuel Sánchez Ron

Es habitual referirse a la teoría de la evolución de las especies como la teoría «de Charles Darwin». Pero, aunque existen buenos motivos para obrar de esta manera (basados en el gran libro que publicó en 1859, *On the origin of species*), no se hace justicia a quien llegó a las mismas ideas que Darwin antes de que este las diera a conocer públicamente: Alfred Russel Wallace (1823-1913), un «inglés nacido en Gales» como se denominaba a sí mismo.

Alfred Russel Wallace

Obligado por la situación económica de su familia (era el octavo de nueve hijos), Wallace tuvo que ganarse la vida como agrimensor, maestro de dibujo, cartografía y agrimensura, y, junto a algunos de sus hermanos, promotor de pequeñas empresas hasta que, finalmente, gracias a sus lecturas de obras de Humboldt, Darwin y Lyell, y a la amistad con un joven que compartía sus mismas aficiones y escasos recursos, Henry Walter Bates (1825-1892), lo ganó el estudio de la naturaleza. Pero, al contrario que Darwin, para ejercer tal interés no le quedó más recurso que ganarse la vida vendiendo especímenes que recogía en largos viajes (primero, entre 1848 y 1852, por América, periplo en el que le acompañó Bates; luego, de 1854 a 1862, en el archipiélago malayo).

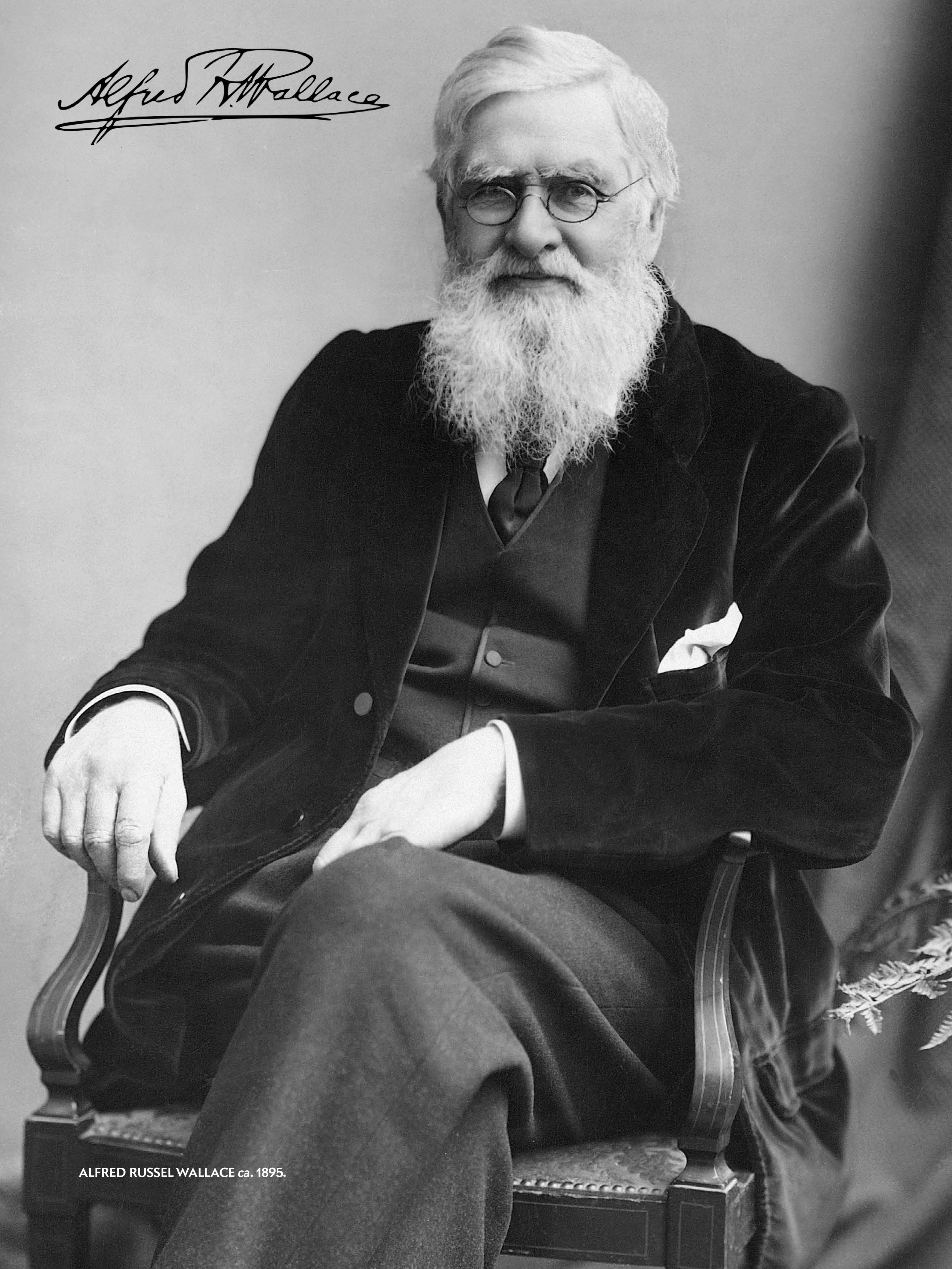
En septiembre de 1855, Wallace publicó en *Annals and Magazine of Natural History* su primer artículo teórico, «Sobre la ley que ha regulado la introducción de nuevas especies», en el que argumentaba que una especie nueva siempre empieza a existir en un área ya ocupada por especies emparentadas, una idea con claras implicaciones evolucionistas: «Toda especie ha llegado a existir [escribía al final de su artículo] coincidiendo tanto en el espacio como en el tiempo con especies preexistentes estrechamente relacionadas». Pero no ofrecía ninguna explicación de cómo se forman las nuevas especies.

En su autobiografía, Wallace recordó que «poco después de que apareciera en artículo, el señor Stevens me escribió informándome de que había escuchado a varios naturalistas expresar disgusto porque yo estaba “teorizando”, cuando lo que había que hacer era recoger más datos. Después de esto, en una carta a Darwin le expresé mi sorpresa porque parecía que mi artículo fuese apenas conocido, a lo que él respondió que tanto *Sir* Charles Lyell como el señor Edward Blyth, dos muy buenos hombres, llamaron su atención especialmente sobre él». La carta de Darwin a la que se refería Wallace es del 22 de diciembre de 1857, pero antes de eso, el 1 de mayo de 1857, aquel respondía a una carta anterior de este:

Mi querido señor:

Le agradezco mucho su carta del 10 de octubre [1856] desde Célebes, que he recibido hace pocos días [...]. Por su carta e incluso más por su artículo en Annals*, de hace un año o más, puedo ver con claridad que hemos pensado de manera parecida y en*

WIKIPEDIA/DOMINIO PÚBLICO



ALFRED RUSSEL WALLACE *ca.* 1895.

alguna medida llegado a conclusiones similares. Con respecto a su artículo en Annals, *estoy de acuerdo con la verdad de casi todas las palabras de su artículo; y me atrevo a decir que estará de acuerdo conmigo en que es muy raro que uno se encuentre que está de acuerdo bastante estrechamente con cualquier artículo teórico; ya que es lamentable cómo se extraen diferentes conclusiones a partir de los mismos hechos. Este verano hará veinte años (i) que comencé mi primer cuaderno de notas sobre la cuestión de cómo y de qué manera las especies y variedades se diferencian unas de otras. Ahora estoy preparando mi trabajo para su publicación, pero encuentro el tema tan amplio que, aunque he escrito muchos capítulos, no espero que entre en imprenta antes de dos años.*

Nunca he sabido cuánto tiempo piensa permanecer en el archipiélago malayo; deseo poder beneficiarme de la publicación de sus viajes allí antes de que aparezca mi trabajo, ya que no dudo de que recogeré de él una gran cosecha de hechos.

La crisis de 1858

Así quedó todo hasta que, en febrero de 1858, mientras soportaba un ataque de fiebre en Gilolo (o Halmahera), la mayor isla del archipiélago de las Molucas, Wallace llegó en esencia a la misma idea de la causa de la selección natural que comúnmente se adjudica en exclusiva a Darwin. Y, desde otra isla, Ternate, envió a Darwin el manuscrito que preparó: «Sobre la tendencia de las variedades a alejarse indefinidamente del tipo original». (La carta y el manuscrito original se han perdido.)

Cuando este lo recibió, consultó inmediatamente con dos amigos suyos: Lyell, geólogo y figura reconocida de la ciencia británica, y Joseph Dalton Hooker, especialista en taxonomía y geografía de plantas. De hecho, Lyell —que junto a Hooker y el norteamericano Asa Gray conocía sus ideas sobre la evolución de las especies— ya le había urgido antes a que diese a conocer públicamente su teoría, requerimiento al que Darwin contestaba el 3 de mayo de 1856:

Con respecto a su sugerencia de un esbozo de mi punto de vista, no sé qué pensar, pero reflexionaré sobre ello; sin embargo, va en contra de mis prejuicios. Realizar un boceto adecuado sería absolutamente imposible, dada la gran colección de hechos que exige cada proposición. Si hiciera algo, solo podría referirse al principal agente del cambio, la selección, y quizá señalar unos pocos rasgos directivos que sancionan dicho punto de vista, y unas pocas de las principales dificultades. Pero no sé qué pensar: antes bien, odio la idea de escribir por conseguir la prioridad; sin embargo, por supuesto, me irritaría que alguien publicara mis doctrinas antes que yo.

Pero en 1858, ante la situación que se había creado, Lyell y Hooker arreglaron todo para que el artículo de Wallace se publicara en *Journal of the Proceedings of the Linnean Society*, junto con otro (muy breve) preparado rápidamente por Darwin y un extracto de una carta que Darwin había enviado a Asa Gray el 5 de septiembre de 1857, informándole de su teoría. Firmado por ambos (en orden alfabético) y bajo el título conjunto de «De la tendencia de las especies a formar variedades, y de la perpetuación de las variedades y especies por medios naturales de selección», el comunicado fue leído ante la Sociedad Linneana el 1 de julio de 1858. Precediendo a los escritos de los dos naturalistas se incluía la siguiente nota de Lyell y Hooker, fechada el 30 de junio:

Estimado señor:

Los artículos adjuntos, que tenemos el honor de comunicar a la Sociedad Linneana, y que se refieren todos al mismo asunto, a saber, las leyes que afectan a la producción de variedades, razas y especies, contienen los resultados de las investigaciones de dos infatigables naturalistas, el señor Charles Darwin y el señor Alfred Wallace.

Habiendo concebido ambos caballeros de manera independiente y sin conocimiento mutuo la misma muy ingeniosa teoría para explicar la aparición y perpetuación de variedades y formas específicas en nuestro planeta, pueden reclamar con justicia el mérito de ser los pensadores originales de esta importante línea de investigación; pero no habiendo ninguno de ellos publicado sus opiniones, aunque nosotros mismos, durante los últimos años, hemos instado repetidamente al señor Darwin a que así lo hiciese, y habiendo ambos autores puesto ahora sus artículos incondicionalmente en nuestras manos, consideramos que sería del mayor interés para las ciencias que se presentasen unos extractos ante la Sociedad Linneana.

La reacción de Wallace y los remordimientos de Darwin

A pesar de que no habría sido difícil que surgiesen recelos, especialmente por parte de Wallace, el carácter de este no provocó semejante resultado. El 6 de octubre de 1858 escribía a su madre, todavía desde el archipiélago malayo:

Acabo de regresar de un breve viaje y ahora voy a comenzar uno nuevo, pero a un lugar donde hay algunos soldados, un doctor y un ingeniero que hablan inglés, por lo que si es bueno para recoger [especímenes] permaneceré allí algunos meses. Es Batchian [Bacan], una isla al sudoeste de Gilolo, a unos dos o tres días de navegación desde Ternate. Ya estoy bastante recuperado de mi viaje a Nueva Guinea y tengo buena salud.

He recibido cartas del señor Darwin y del señor Hooker, dos de los naturalistas más eminentes de Inglaterra, que me han satisfecho mucho. Envié al señor Darwin un ensayo sobre un tema sobre el que él está escribiendo ahora un gran libro. Se lo enseñó al doctor Hooker y a Sir *C. Lyell, que pensaron tan altamente de él que inmediatamente lo leyeron en la Sociedad Linneana. Esto me asegura el conocimiento y ayuda de estos eminentes hombres cuando regrese a casa.*

Darwin, un hombre decente, albergaba dudas sobre cómo se había desarrollado todo el proceso, y desde luego reconoció la buena disposición de Wallace, como prueban dos cartas que le dirigió a este. La primera está fechada el 25 de enero de 1859 y en ella escribió:

Mi querido señor:

Me agradó extremadamente recibir hace tres días su carta, la dirigida a mí y la que envió al doctor Hooker. Permítame decirle cuánto de todo corazón admiro el espíritu con que están escritas. Aunque no he tenido absolutamente nada que ver con lo que Lyell y Hooker han pensado que es el modo correcto de acción, naturalmente no podía sino sentirme ansioso por conocer cuál sería su impresión. Indirectamente les debo mucho a usted y a ellos, porque casi pienso que Lyell habría estado en lo cierto y nunca habría completado mi trabajo extenso, ya que he encontrado mi resumen [On the origin of species] *suficientemente duro para mi pobre salud. Pero ahora, gracias a Dios, estoy con el penúltimo capítulo. Mi resumen será un pequeño volumen de 400 o 500 páginas. Cuando se publique, por supuesto le enviaré un ejemplar y entonces verá lo que quiero decir sobre el papel que creo que ha desempeñado la selección con las producciones domésticas. Es un papel, como usted supondrá, del que juega la «selección natural».*

En la posdata de la segunda carta, del 6 de abril de 1859, cuando estaba a punto de publicar *On the origin of species*, Darwin se sinceraba:

No puedo decirle cuánto admiro su espíritu, la manera en que ha tomado todo lo relativo a la publicación de nuestros artículos. De hecho, le había escrito una carta, diciendo que yo no debería publicar nada antes de que lo hubiese publicado usted. No había puesto esa carta en el correo cuando recibí una de Lyell y Hooker, instándome *a enviarles algún manuscrito y permitirles que actuaran como considerasen justo y honorable para nosotros dos. Y así lo hice.*

Aunque el comportamiento de Darwin fue decente, podemos hacernos una idea más correcta de ese comportamiento recurriendo a una carta que escribió a Lyell el 25 de junio de 1858, cuando se encontraba agobiado tras haber recibido las noticias de Wallace:

No hay nada en el esbozo de Wallace que no esté escrito de una manera mucho más completa en mi borrador copiado en 1844, y leído por Hooker hace unos 12 años. Hace alrededor de un año envié un corto esbozo, del que tengo copia, de mis puntos de vista [...] a Asa Gray, de manera que podría decir con la mayor sinceridad y probar que no he cogido nada de Wallace. Me alegraría sobremanera *publicar* ahora *un esbozo de mis opiniones generales en aproximadamente una docena de páginas más o menos. Pero no consigo persuadirme a mí mismo de que puedo hacerlo de manera honorable. Wallace no dice nada sobre publicación, y yo adjunto su carta. Pero, puesto que no tenía pensado publicar nada, ¿puedo hacerlo con honor porque Wallace me ha enviado un esbozo de su doctrina? Quemaría todo mi libro antes de que él o cualquier otro pudiera pensar que me he comportado indignamente. ¿No cree que el hecho de que él me haya enviado este esbozo me ata las manos? [...]*

Si pudiera publicar con honorabilidad explicaría que me he visto inducido ahora a publicar un esbozo (y me alegraría mucho que me permitiera decir que siguiendo un consejo que usted me dio hace mucho tiempo) al haberme enviado Wallace un esbozo de mis propias conclusiones generales. Solamente diferimos en que yo llegué a mis opiniones a partir de lo que la selección artificial ha hecho con los animales domésticos.

Darwin, en otras palabras, estaba rogando a Lyell que le ayudasen a publicar sus ideas junto a las de Wallace. ¿Sorprenderá a alguien que después de leer su carta Lyell propusiera que ambos, Wallace y Darwin, compartieran el honor de la presentación pública de sus respectivas ideas sobre la evolución? Fue una solución justa. Darwin se había retrasado en publicar, pero solo por su propia autoexigencia, que le imponía buscar más y más pruebas, mientras que Wallace no padecía de estos sentimientos. La solución fue buena, pero, desde luego, Darwin sufrió: «Siempre pensé», escribió a Hooker el 13 de julio de 1858, «que era posible que alguien se me anticipara, pero suponía que iba a tener la suficiente grandeza de espíritu como para que no me importara; pero me he encontrado a mí mismo castigado y equivocado».

Una vez publicado el libro de Darwin, Wallace comentó su contenido a Henry Walter Bates en una carta del 24 de diciembre de 1860, desde Ternate:

No sé cómo o a quién expresar de manera completa mi admiración por el libro de Darwin. A él le parecería adulación, a otros, autoalabanza, pero honestamente creo que aunque con mucha paciencia hubiese trabajado y experimentado sobre el tema, nunca podría haber acercado *a la completitud de su libro su vasta acumulación, sus abrumadores argumentos y sus admirables tono y espíritu. Me siento realmente agradecido de que no hubiera recaído en mí presentar la teoría al público. El señor Darwin ha creado una nueva ciencia y una nueva filosofía, y creo que nunca semejante completa presentación de una nueva rama del conocimiento humano se ha debido al trabajo e investigaciones de un solo hombre. Nunca tales vastas masas anteriormente desparramadas y radicalmente desconectadas han sido combinadas en semejante grande, nueva y sencilla filosofía.*

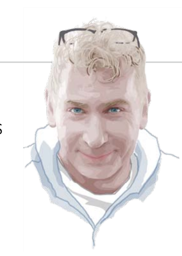
PARA SABER MÁS

My life. A record of events and opinions. Alfred Russel Wallace. Chapman & Hall, Londres, 1905.
Alfred Russel Wallace. Letters and reminiscences. James Marchant. Harper & Brothers Publishers, Nueva York, 1916.
Cartas de Darwin (1825-1859). Dirigido por Frederick Burkhardt. Cambridge University Press, Madrid, 1999.

EN NUESTRO ARCHIVO

Charles Darwin y Alfred Wallace ante el espiritismo. Richard Milner en *IyC*, diciembre de 1996.
Compañeros de viaje. Barbara Continenza en *Darwin*, colección Temas, n.º 54, 2008.
Wallace, el evolucionista radical. Andrew Berry en *IyC*, octubre de 2013.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Memes matemáticos en Internet

El término *meme*, concebido para designar una unidad teórica de transmisión cultural, se aplica hoy a un tipo de creaciones que triunfan en las redes sociales. Combinan humor, ingenio y, muy a menudo, también rigor

EL TÉRMINO *MEME* fue acuñado en los años setenta del siglo pasado por el biólogo evolutivo Richard Dawkins (*imagen*) para referirse a la unidad básica de transmisión cultural, equivalente a los genes en biología. Hoy el concepto se ha ampliado para incluir ciertos contenidos muy populares en las redes sociales.

Un carro con ruedas radiadas no solo lleva grano u otras mercancías de un lugar a otro; lleva la brillante idea de un carro con ruedas radiadas de una mente a otra.
(Daniel Dennett, *La conciencia explicada*, 1995)

En 1976, mucho antes del advenimiento de Internet, el biólogo evolutivo Richard Dawkins acuñó el término *meme* para definir una unidad de cultura humana: una unidad mínima de información que se transmite de persona a persona; que puede cambiar, pero manteniendo al mismo tiempo su identidad, como ocurre con un eslogan publicitario o con una melodía pegadiza. Dawkins proponía que la evolución cultural era totalmente análoga a la biológica. Y aunque esto ya lo habían apuntado teóricos anteriores, el concepto de meme abría la posibilidad de otorgar un enfoque matemático a los procesos de evolución cultural.

El neologismo *meme* fue creado por Dawkins por su semejanza fonética en inglés con la palabra *gene*. Al igual que nuestro genoma está formado por genes, los cuales se transmiten de una generación a otra, la información cultural se transmite de cerebro a cerebro. Los memes serían las unidades simples de información, como una idea o una habilidad, que, como apunta mi admirado filósofo Jordi Cortés, presenta «las características propias de todo proceso evolutivo: fecundidad (algunas ideas son especialmente efectivas, como la idea de Dios, por ejemplo), longevidad (muchas de ellas persisten durante mucho tiempo: la monogamia o la fe, por ejemplo) y fidelidad en la replicación (carácter conservador de las tradiciones y de muchas creencias y supuestos, especialmente las transmitidas verticalmente: de padres

a hijos o de maestros a alumnos). A su vez, se dan en un amplio campo de variación, se replican a sí mismas por mecanismos de imitación y transmisión de cerebro a cerebro, y engendran un amplio abanico de copias que subsisten en diversos medios».

Memes de Internet

Si hoy preguntamos a cualquier persona qué es un meme, probablemente nos dirá que se trata de una imagen o un vídeo viral, generalmente no exento de humor, que se comparte en las redes sociales. ¿Recuerdan *Ooga-chaka baby*, un GIF animado de un bebé bailando? Apareció en 1996 y muchos lo asociamos a la serie de televisión *Ally McBeal*. Fue uno de los primeros vídeos virales de Internet y hoy se considera uno de los memes de Internet más antiguos.

Los memes circulan masivamente por las redes desde el nacimiento de la Web 2.0 a comienzos de siglo. Gracias a su naturaleza digital se han convertido en ratones de laboratorio ideales para estudiar la evolución cultural. Su parecido con los virus informáticos y las epidemias los ha convertido desde sus inicios en preciados objetos de estudio para matemáticos y físicos de sistemas complejos interesados en las formas masivas de propagación cultural. En concreto, sus características permiten investigar qué los hace virales o por qué mueren, preguntas de sumo interés para la mercadotecnia.

Mientras que el humor se ha mantenido como un rasgo constante a lo largo de su evolución, los temas y los estilos de los memes en Internet han cambiado a lo largo de los años, desde simples imágenes divertidas hasta punzantes sátiras y opiniones políticas o filosóficas. La adicción por estos tropos visuales, que suelen combinar texto e imagen, acabó afectando también a grupos especializados de todo tipo, quienes comenzaron a usarlos para transmitir un conocimiento más específico y técnico. Y, por supuesto, entre los temas elegidos no podían faltar las matemáticas. Lo que sigue no es más que una pequeña muestra comentada de la variedad e ingenio de muchos de los memes matemáticos que circulan por las redes. Con esta columna solo trato de ponerlos en valor y hacerles sonreír un rato. Espero que los disfruten. IyC

VARIEDAD DE FORMATOS

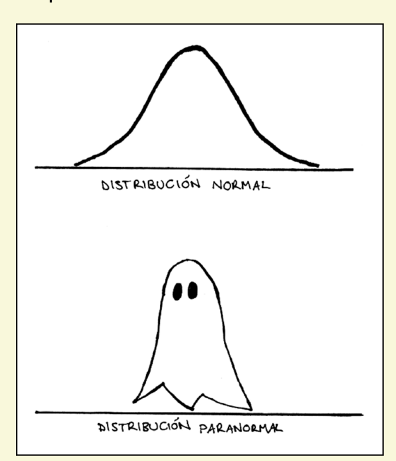
Tres memes matemáticos que ilustran la variedad de sus composiciones. El primero constituye un ejemplo canónico de composición de un meme en Internet: una imagen central, acompañada de una presentación en texto arriba y un desenlace en texto abajo. El segundo es un pantallazo de un tuit que me llegó vía Facebook, y el tercero es la fotografía digital de un dibujo que recibí por correo electrónico.





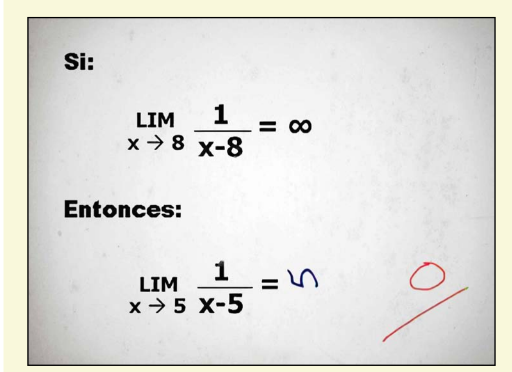


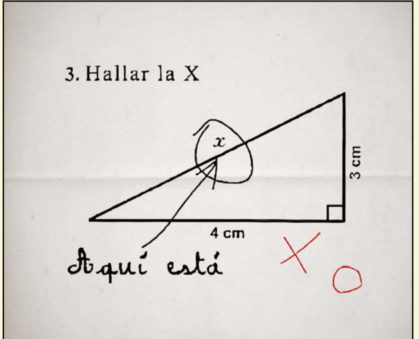
Murió asesinado en Siracusa (Sicilia) en el año 212 a.C.
Y os digo esto porque todo el mundo se sabe el principio de Arquímedes y muy pocos el final...

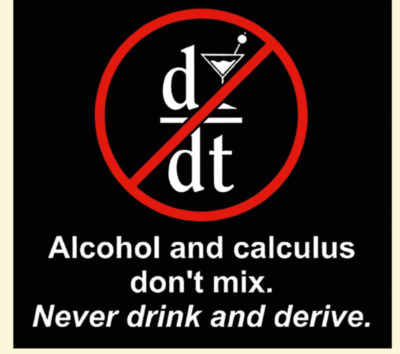


MEMES CLÁSICOS

He aquí varios memes matemáticos que nos acompañan desde hace más de una década. Estoy convencido de que el lector ha visto más de una vez las respuestas creativas mostradas en los dos primeros, ejemplos de longevidad que circulan por las redes. Otros, como el tercero («El alcohol y el cálculo no combinan bien. Nunca bebas y derives», que juega con la similitud de las palabras inglesas *drive* y *derive*, «conducir» y «derivar»), han trascendido la propia Internet, hasta el extremo de que he llegado a tener una camiseta con la imagen. De hecho, todos los memes que aparecen en estas páginas, si no lo habían hecho ya, han conseguido trascender al formato digital gracias a esta columna.



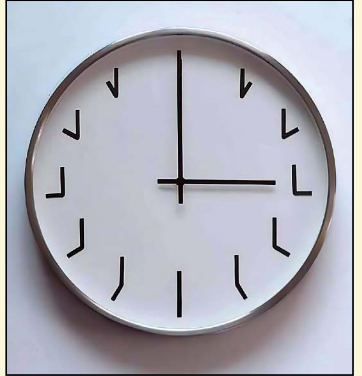




SIN PALABRAS

Los memes no siempre necesitan texto, sino que en ocasiones basta con una sola imagen. Así ocurre con esta yema de huevo fractal (*izquierda*); con el reloj que da como hora la hora que da el reloj (*centro*); y con esta sorprendente forma de vislumbrar la distribución normal, donde el desgaste de la pintura en las pesas de un gimnasio revela que las más usadas son las de peso intermedio (*derecha*).

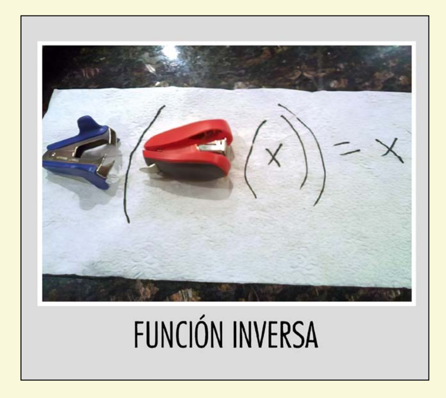


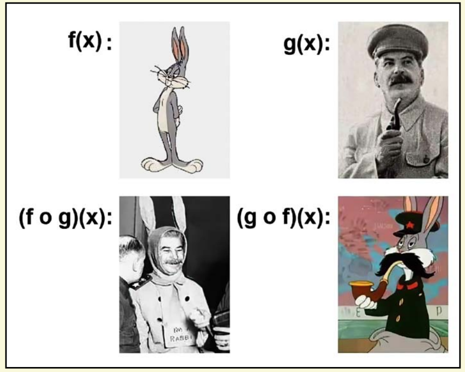


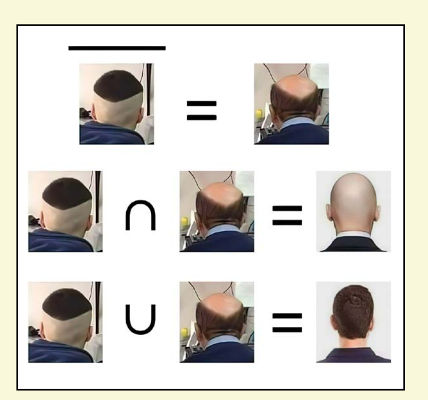


MEMES DIDÁCTICOS

Hace unos cuantos años que comenzaron a aparecer memes matemáticos con intenciones didácticas. Estas geniales imágenes explican, respectivamente, qué es la función inversa, la composición de funciones y algunas operaciones con conjuntos. El ingenio, combinado con el desparpajo, de estos memes consigue presentar conceptos matemáticos con una claridad y generalidad que difícilmente pueden conseguirse con menos recursos comunicativos.

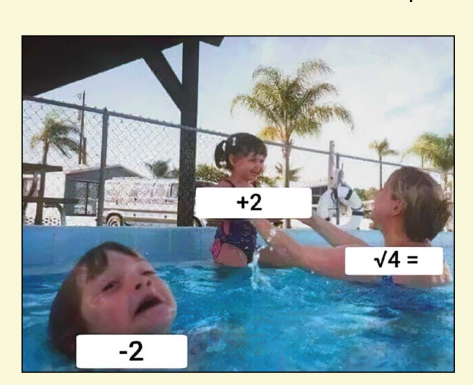


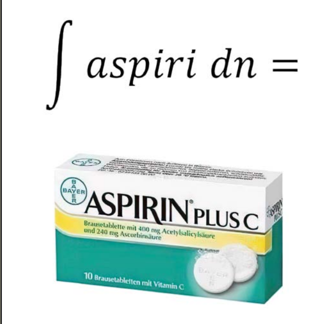


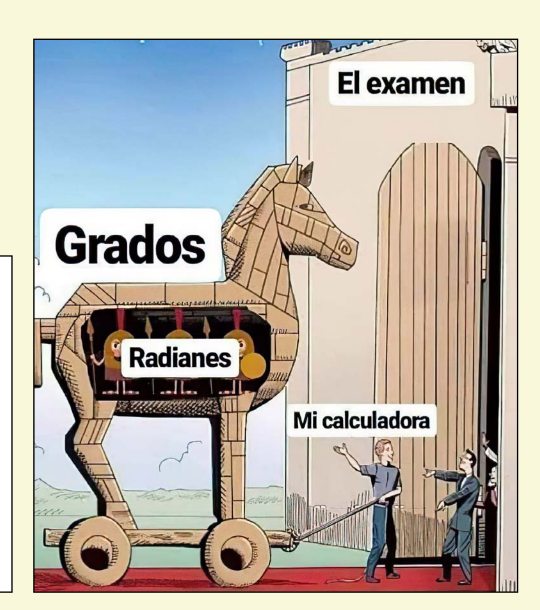


ERRORES COMUNES

Al respecto de su valor didáctico, hay toda una serie de memes asociados a los errores más habituales que suelen cometer los estudiantes de matemáticas. Entre ellos, olvidar que una raíz cuadrada tiene dos soluciones (*izquierda*); pasar por alto que, al calcular una integral indefinida, hay que añadir siempre una constante (*centro*); o confundir radianes y grados en la calculadora (*derecha*). En mi opinión, una buena forma de vacunarse contra tales errores es precisamente crear memes como estos.



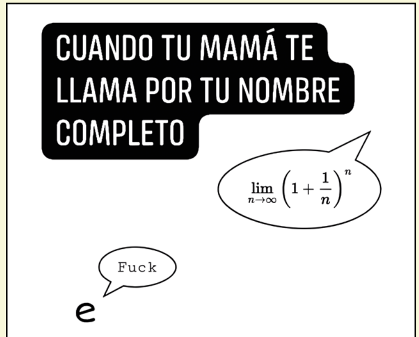


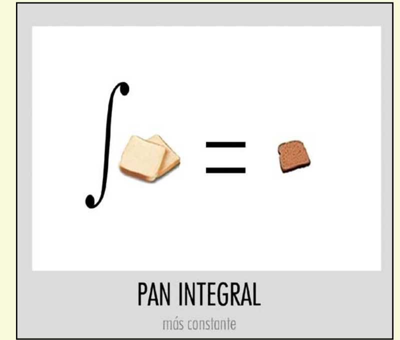




MEZCLA DE LENGUAJES

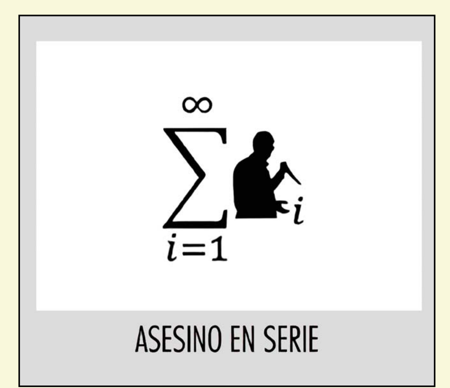
Una clase de memes que encuentro particularmente atractivos son aquellos que mezclan el lenguaje simbólico de las matemáticas con el lenguaje natural o con imágenes. Si usted ha sonreído al ver alguno de estos ejemplos, como me ocurrió a mí, definitivamente es un friki, porque son ciertamente malos.

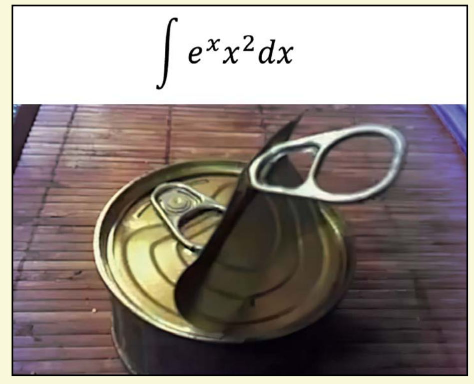


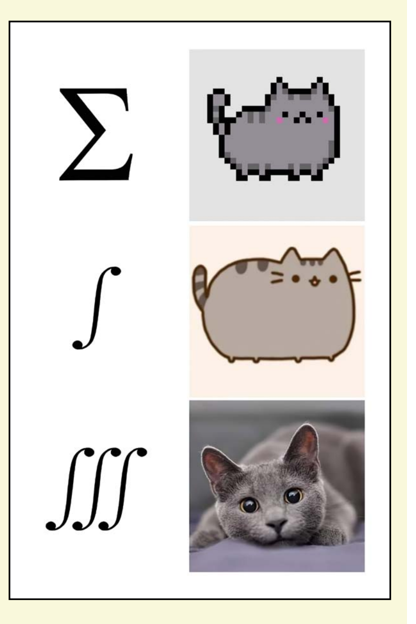


MEMES ARTÍSTICOS

Harina de otro costal son estos tres memes. La mezcla surrealista de imagen, símbolos y texto en el primero es brillante. El segundo es un guiño para quien sepa que la integral en cuestión necesita resolverse por partes dos veces. Y brillante es también en el tercero la presentación visual mediante gatitos —símbolo por excelencia de los memes en Internet— de las diferencias entre una suma discreta, una integral y una integral triple. Memes como estos están a la altura de las famosas poesías visuales de Joan Brossa, los artefactos de Nicanor Parra o las fotografías de Chema Madoz.







CREE SUS PROPIOS MEMES

Les invito a que disfruten creando memes matemáticos y, sin son lo suficientemente excéntricos, a que sigan su evolución a través de portales como www.quickmeme.com, donde son puntuados por los usuarios. El meme de la izquierda es mi homenaje al famoso algoritmo ideado en 1959 por Edsger W. Dijkstra, teórico de la computación, para hallar el camino más corto entre dos nodos de un grafo, toda una referencia para quienes trabajamos en redes complejas. Y para acabar, les presento el que será el tema de mi próxima columna. ¿Lo reconocen?

Elka: ¿Vas a venir?
Dijkstra: Iría, pero hay demasiados caminos posibles a tu casa. No sé cómo determinar, en un tiempo razonable, cuál es el más corto.
Elka: Mis padres no están en casa...
Dijkstra:

A Note on Two Problems in Connexion with Graphs

By

E. W. Dijkstra

We consider *n* points (nodes), some or all pairs of which are connected by a branch; the length of each branch is given. We restrict ourselves to the case where at least one path exists between any two nodes. We now consider two problems.

Numerische Mathematik 1, 269—271 (1959)



PARA SABER MÁS

El gen egoísta: Las bases biológicas de nuestra conducta. Richard Dawkins. Salvat, 1993.

¿Qué son los memes? Introducción general a la teoría de memes. Jordi Cortés Morató, 1997. Disponible en **www.pensament.cat/memes.htm**

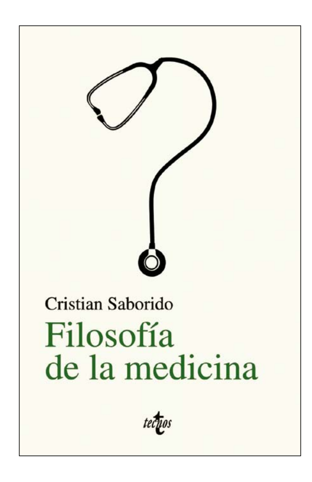
El meme eléctrico. Robert Aunger. Paidós, 2003.

EN NUESTRO ARCHIVO

Frases víricas y estructuras lingüísticas autoduplicantes en el reino de las ideas. Douglas R. Hofstadter en *IyC*, marzo de 1983.

El poder de los memes. Susan Blackmore en *IyC*, diciembre de 2000.

La teoría de los memes trivializa el desarrollo de la cultura. Robert Boyd y Peter J. Richerson en *IyC*, diciembre de 2000.



FILOSOFÍA DE LA MEDICINA

Cristian Saborido
Tecnos, 2020
288 págs.

La filosofía de la medicina más allá de bioética

De cómo algunos conceptos que creíamos claros se convierten en problemáticos

La profesión médica se encuentra entre las más valoradas por la ciudadanía, entre la que despierta respeto y admiración casi a partes iguales. Por otro lado, es también una profesión de enorme interés desde el punto de vista del análisis histórico, pues se cuenta entre aquellas de las que existe registro de su existencia desde más antiguo. El juramento hipocrático —que, con ligeras variaciones, marca aún hoy el código deontológico entre los médicos profesionales— tiene aproximadamente veintitrés siglos de antigüedad. Se sabe de la importancia que tuvo la enseñanza de la medicina en la Edad Media, primero en las escuelas de Bagdad y la Academia de Gundeshapur, y posteriormente en las primeras universidades europeas fundadas en la Baja Edad Media. Y durante todos estos siglos, la medicina ha ido cambiando en sus métodos, en su forma de abordar los problemas y en las técnicas que van posibilitando nuevos diagnósticos y nuevas terapias, todo ello sin perder una parte importante de su esencia y de sus objetivos.

Sin embargo, la reflexión filosófica sobre ella es relativamente reciente. Muchos son los problemas que pueden identificarse desde la filosofía en relación con la medicina. Es posible que los primeros que nos vengan a la mente sean aquellos de índole ética; dilemas que los médicos han de enfrentar en su trabajo y con los que los pacientes y sus familiares han de lidiar en momentos de sufrimiento. Ciertamente la bioética ha sido un campo de estudio y trabajo muy fecundo en las últimas décadas. No obstante, no son estos los únicos problemas que interesan a la filosofía. Así nos lo muestra Cristian Saborido en su libro *Filosofía de la medicina*, una muy recomendable introducción al tema tanto para los filósofos que sientan curiosidad por un ámbito de reflexión nuevo como también, y especialmente, para los propios médicos que tengan inquietudes humanistas, que son muchos.

Uno de los ejes sobre los que Saborido estructura el libro es la tensión existente entre quienes tienen una visión «naturalizada» de la profesión médica y aquellos que defienden una concepción «constructivista». Los primeros entenderían que la medicina es el resultado de aplicar ciertos conocimientos proporcionados por la biología, de tal manera que esta propondría cómo funciona un organismo sano y la medicina trataría de emplear dichos conocimientos para devolver a los organismos enfermos a ese estado de salud ideal. Sin embargo, las propias nociones de salud y enfermedad están traspasadas por más elementos que los meramente biológicos [*véanse* «¿Qué significa estar sano o enfermo?», por Cristian Saborido, Investigación y Ciencia, enero de 2018; *y* «¿Qué es ser "normal"?», por Andrew Solomon, Investigación y Ciencia, agosto de 2018].

Saborido nos muestra cómo, durante algunos períodos históricos lamentables, se consideraron enfermedades varias cosas que hoy nunca entenderíamos como tales. Un ejemplo que nos puede parecer inventado por su crueldad es una «patología», de la que no creo que muchos de ustedes hayan oído hablar, descrita por el médico norteamericano Samuel A. Cartwright en el siglo xix y denominada *drapetomanía*. Esta «enfermedad» se diagnosticaba a los esclavos negros que tenían «ansias de libertad». La padecían si no eran tratados en condiciones saludables, decía Cartwright, y recomendaba que, en caso de que los esclavos «levantasen su cabeza al mismo nivel que su dueño o capataz», fuesen castigados hasta que cayesen «en el lugar de sumisión que les fue destinado ocupar».

Otro de los asuntos que también destaca en el libro de Saborido es una pregunta que ya el propio Aristóteles se planteó hace veinticuatro siglos: dilucidar qué parte de la medicina puede ser descrita como una ciencia y qué parte debe considerarse un arte, entendiendo como «arte» un saber que todo buen médico aprende y desarrolla a partir del trabajo práctico con los pacientes.

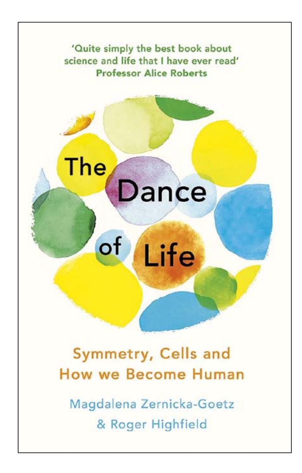
La manera en la que se aprende a ser médico requiere, desde muy antiguo, un largo período de entrenamiento junto con médicos veteranos, quienes ayudan a los aprendices a adquirir saberes que difícilmente podrían obtenerse a través de la enseñanza en un aula. Por otro lado, la medicina también se distingue de otras disciplinas científicas porque, como señala Saborido, «es una disciplina prescriptiva, un saber que propone una intervención en el mundo de acuerdo con ciertas ideas de lo que consideramos como bueno o malo». Y esto diferencia radicalmente a la medicina de otras ciencias, como la física o la biología, a pesar de hallarse en principio emparentada con esta última. Saborido insiste a lo largo del libro en este aspecto normativo, que hace que los médicos deban desarrollar otras facultades más cercanas a las ciencias sociales o aplicadas que a las ciencias básicas. No en vano, están tratando con la vida y la salud de seres humanos. Esta sabiduría práctica fue denominada *frónesis* por los griegos y ha sido traducida habitualmente como «prudencia»; una prudencia que contraponían a la *hybris*, el orgullo. Un buen médico debe ser más prudente que orgulloso y disponer de ese entendimiento moral para poder tratar con sus pacientes de la manera adecuada.

Otro de los aspectos que aborda Saborido es el espinoso asunto de las enfermedades mentales, al que dedica todo un capítulo. Si ya es difícil, como bien nos muestra, determinar qué es la salud y qué la enfermedad, en el caso de los trastornos mentales eso resulta todavía más complicado. A lo largo de la historia y entre diferentes culturas, la decisión de que alguien padece una enfermedad mental puede depender más de qué se considera un comportamiento aceptable frente a aquello que se sale de la norma. Sin em-

bargo, lo que no puede pasarse por alto es que las personas que padecen una enfermedad de este tipo sufren, y por ello se ha de encontrar solución a su padecimiento. En algunas ocasiones el sufrimiento se origina precisamente por no encajar con la norma social, de manera que cuando esta cambia, la enfermedad también desaparece, tanto desde el punto de vista del que la sufría como desde el punto de vista del diagnóstico. En otras ocasiones no es tan sencillo, y el sufrimiento puede deberse a otras causas mucho más complejas, si cabe, de tratar.

Filosofía de la medicina puede ser una buena introducción para aquellos que deseen obtener un primer contacto con la disciplina. No obstante, para quienes ya tengan más relación con estas cuestiones, el libro puede resultar en exceso introductorio. Esto no es necesariamente un defecto, puesto que el autor deja claro desde el principio su afán de servir de incursión preliminar para aquellos lectores no familiarizados con el tema. Sin embargo, y como suele suceder con todos los libros de filosofía, el autor puede dar por supuesto algunos conocimientos que, por resultar familiares para él y sus colegas de profesión, no explica con la necesaria claridad para los profanos. Intenta solucionar en parte este asunto con un glosario final, que puede ser de utilidad, aunque es posible que resulte escaso para algunos lectores. De la misma manera, se echa en falta una bibliografía más orientada, que permita una profundización en cada uno de los temas. Pero, en cualquier caso, y más teniendo en cuenta la escasez de introducciones a la filosofía de la medicina en español, resulta una contribución valiosa a este ámbito de reflexión.

—Ana Cuevas Badallo
Departamento de Filosofía, Lógica y Estética
Universidad de Salamanca



THE DANCE OF LIFE
SYMMETRY, CELLS AND HOW WE BECOME HUMAN
Magdalena Zernicka-Goetz y Roger Highfield
WH Allen, 2020
304 págs.

El ritmo del origen de una vida

Del extraordinario proceso por el que un embrión unicelular acaba convirtiéndose en el organismo más complejo que conocemos

Es esta una autobiografía científica donde las preocupaciones personales de una maternidad dubitativa se entrelazan con los avances en embriología sintética de una reconocida genetista, quien nos muestra por qué no existe nada más atractivo que conocer los pasos que dictan la construcción de nuestro cuerpo, de nuestro cerebro y de nosotros mismos. Magdalena Zernicka-Goetz y Roger Highfield iluminan ese milagro de la naturaleza a través de una observación minuciosa y experta de la danza de la vida, desde la concepción del cigoto hasta el parto. Para visualizarlo, se proyecta una suerte de película que va concatenando fotogramas desde el óvulo fecundado hasta las decenas de billones de células de diferentes tipos que componen un organismo humano, más que estrellas hay en nuestra galaxia. De cómo una célula se convierte en un organismo se ocupa la embriología.

Una de las disciplinas que registra mayor dinamismo en nuestros días, la embriología fue la primera en configurarse. Nació en Grecia, hace dos milenios y medio, con Aristóteles. Se cree que el estagirita diseccionó la anatomía de 35 especies y las comparó, incluido un embrión humano de cuarenta días. Se opuso al preformacionismo, la idea de que existe una versión en miniatura del organismo plenamente constituido, que se limita a ir creciendo, y apoyó la epigénesis, o desarrollo a través de una serie de etapas por las que se van formando los órganos en el curso del tiempo.

En la especie humana, el gameto masculino y el femenino proceden de elementos precursores, las células germinativas primordiales, que atraviesan un período de maduración y diferenciación conocido como gametogénesis. Esta maduración entraña la división en dos del patrimonio cromosómico de las células germinativas a través del proceso de meiosis y de la sucesiva maduración morfológica de los gametos. En el varón, las divisiones meióticas comienzan en la pubertad, mientras que la maduración de los gametos en la mujer se da ya en la vida fetal.

El espermatozoide maduro es una célula epitelial altamente especializada, capacitada para penetrar en el óvulo. Con una longitud aproximada de 50 micrómetros, recorre, desde los testículos hasta alcanzar el óvulo, más de cien mil veces su propia extensión. Los ovocitos maduros pueden alcanzar un tamaño de hasta 150 micrómetros. El núcleo del ovocito solo completa su maduración meiótica cuando penetra el espermatozoide.

La fecundación conlleva un proceso autoorganizativo de interacción, reestructuración y cambio de los cromosomas de los gametos de los progenitores. Punto de arranque del nuevo organismo, con su propio programa único y distinto, consta de tres etapas: la reacción acrosomial, que permite al espermatozoide atravesar los estratos que rodean al ovocito; la fusión de los gametos, o singamia, que determina la activación del ovocito y la reacción cortical que regula la entrada del espermatozoide (la singamia es un proceso irreversible); y la formación de pronúcleos masculino y femenino y el primer proceso mitótico de segmentación. La mezcla de los cromosomas y su preparación para dar lugar a la primera división celular marcan el final de la fecundación y el comienzo del desarrollo embrionario.

Resulta extraordinario que un embrión unicelular, sin cerebro interno ni dictamen externo, se divida y multiplique hasta convertirse en el ser más complejo que conocemos. Existen centenares de tipos celulares, desde las neuronas hasta las células epidérmicas. Todas poseen el

mismo ADN, pero difieren unas de otras en determinadas partes de la secuencia (genes) que se expresan en ellas; es decir, en la clase de proteínas sintetizadas en cada célula. De acuerdo con la melodía particular interpretada en el genoma, la persona alcanza un repertorio de proteínas particular. Las células del cerebro ejecutan un repertorio concreto de los veinte mil genes componentes; otro, las células del intestino, y así el resto.

Durante la primera semana el embrión no crece, sino que se divide en células de tamaño decreciente a medida que va flotando por el oviducto, un entorno que se recrea ya en el laboratorio. A la semana de vida el embrión se implanta en el endometrio materno y es entonces cuando comienza a crecer, alimentándose de factores y hormonas procedentes de la madre. Ese entorno es, por consiguiente, mucho más complejo y rico; más difícil, también, de replicar en condiciones de laboratorio [*véase* «Un modelo de implantación del embrión», por Amander T. Clark; Investigación y Ciencia, febrero de 2020].

Todo biólogo sueña con reconstruir in vitro los procesos de la naturaleza. La embriogénesis no podía quedar al margen. En 2016 se logró cultivar en el laboratorio embriones humanos más allá del tiempo de implantación. Fue el hito del año, junto con el descubrimiento de las ondas gravitacionales. Hasta ahora no se había logrado mantener el embrión in vitro durante tanto tiempo antes de implantarlo. Ello permite conocer los cambios celulares y moleculares de cada célula y la coreografía de sus interrelaciones en la segunda semana de vida, cuando se establecen las células madre del cuerpo futuro y se organizan de nuevas formas.

Dominada esa fase inicial, la ciencia podría identificar al menos algunas condiciones que perturban el desarrollo en un momento en que fracasan muchos embarazos y estudiar el daño que pueden provocar determinados alimentos y otras sustancias en el proceso de formación del embrión, estadio este de suma fragilidad de la vida. Con el tiempo, se podrían crear tests para identificar los embriones que presentaran mayores posibilidades de desarrollo sano antes de transferirlos al útero de la madre potencial. Facultaría también estudiar el destino de células aneuploides en embriones con un número anormal de cromosomas y en embriones que portaran mosaicismo. Pero la ciencia está sujeta a la valoración ética y a la regulación de esa línea de investigación.

Por eso mismo, el libro se detiene en una cuestión palpitante. ¿Hemos de reconsiderar el límite de los catorce días? Esa es la cota legal para los ensayos in vitro con embriones. Se trata de una ley en numerosos países, con restricciones variables. En Estados Unidos, por ejemplo, está prohibido asignar fondos federales a la investigación sobre embriones, pero no existe regulación sobre la investigación financiada por otros medios, salvo que lo prohíba el estado en cuestión.

El día catorce de vida del embrión se asocia a la aparición de indicios de la línea primitiva. El embrión adquiere la forma de disco oval que contiene las tres capas celulares germinales: endodermo, mesodermo y ectodermo. El endodermo contribuye al tracto respiratorio y gastrointestinal; el mesodermo forma el tejido conectivo, el corazón y el tejido muscular; el ectodermo crea el sistema nervioso y la capa epitelial que cubre al embrión.

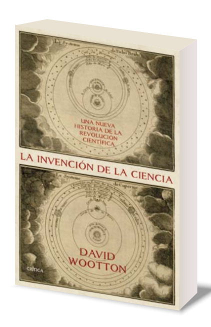
Para saber si el embrión está sano puede tomarse una muestra del vello coriónico, o test CVS (de *chorionic villus sampling*), que detecta anomalías genéticas que provocan defectos de nacimiento. En torno al tercer mes de embarazo, el test CVS consiste en tomar una muestra de células de la placenta, órgano a través del cual se alimenta el feto. Placenta y feto crecen a partir del mismo embrión, y las células de la placenta permiten saber si el feto porta alguna anomalía genética. A veces, el test CVS se complementa con el test de la amniocentesis: se inserta una aguja, guiada por una imagen de ultrasonidos, en el saco amniótico que rodea al feto, para obtener una pequeña muestra de fluido amniótico. Este líquido, que protege al feto en su desarrollo, contiene células que pueden utilizarse para diagnosticar la presencia de trastornos cromosómicos.

El salto cualitativo dado en embriología ha sido, no obstante, la creación del embrión sintético. Tras lograr el cultivo in vitro de embriones, se descifró el número de células implicadas y el contexto de esa creación. Había que seguir la coreografía de cada tipo celular y la interacción mutua en el momento en que arranca la metamorfosis del embrión. El estatuto moral del embrión constituye una cuestión central en cada paso. Todos están de acuerdo en que el embrión humano merece protección de acuerdo con su dignidad humana.

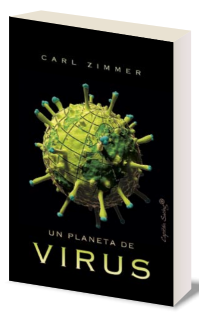
—*Luis Alonso*

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



LA INVENCIÓN DE LA CIENCIA
UNA NUEVA HISTORIA DE LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA
David Wootton
Crítica, 2020
ISBN: 978-84-9199-206-6
800 págs. (29,90 €)



UN PLANETA DE VIRUS
Carl Zimmer
Capitán Swing, 2020
ISBN: 978-84-121979-2-1
144 págs. (16 €)



DISFRUTA DE TU UNIVERSO, NO TIENES OTRA OPCIÓN
Álvaro de Rújula
Catarata, 2020
ISBN: 978-84-9097-952-5
288 págs. (18,50 €)

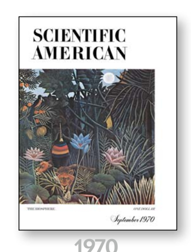
Recopilación de Daniel C. Schlenoff

SEPTIEMBRE

1970

Hipótesis confirmada

«La travesía de quince días por el Pacífico que esta primavera ha realizado el *DeSteiger*, barco de investigación de la armada de EE.UU., ha rendido más pruebas acerca de que la corteza terrestre se compone de placas discretas a la deriva. El viaje aporta un ejemplo del hecho que predice la teoría: cuando tres placas oceánicas se separan, en el lecho marino aparece un área cuneiforme con su vértice en la triple juntura. La hipótesis de McKenzie-Morgan fue publicada en 1968; e impulsó a Kenneth S. Deffeyes, uno de los colegas de Morgan en Princeton, a calcular las dimensiones y la forma de la cuña triple esperable en la zona de las Galápagos. Deffeyes dirigió luego la expedición del *DeSteiger* y recogió los datos que demostraron la exactitud de la hipótesis.»


SCIENTIFIC AMERICAN

1970


SCIENTIFIC AMERICAN

1920


SCIENTIFIC AMERICAN

1870

1870: Fábrica de Relojes Waltham, en la vanguardia.

1920

Control de la malaria

«Entre los raros métodos de prevenir la incubación de las larvas de mosquito está el rociado de ríos y arroyos con queroseno o un crudo pesado clasificado comercialmente justo por debajo del fuelóleo. La operación se realiza con bombas rociadoras de mochila o mediante bidones de goteo. El alto precio del petróleo es un factor que debe tenerse en cuenta, pero un pequeño pueblo maderero del sur de EE.UU. aplicó con éxito esas medidas a un costo de 1,23 dólares per cápita. Las visitas de los médicos para tratar el paludismo se redujeron en un 70 por ciento respecto al año anterior.»

Competición automovilística

«La gran carrera internacional por la Copa Gordon Bennett tendrá lugar el 27 de septiembre en Francia, y pocas dudas caben de que el mundo entero se pasmará ante el arranque a todo gas de las máquinas competidoras. En esta próxima competición no se admitirán máquinas incapaces de superar largamente los 300 kilómetros por hora. Sería absurdo aceptar vehículos tan "lentos". Una vez más, parece que toda máquina de potencia inferior a 250 caballos no tendrá sitio en la próxima carrera; sin duda presenciaremos máquinas con motores de potencias de hasta 600 caballos. Se rumorea que algunos contendientes europeos podrían emplear ¡motores de 1000 caballos!»

1870

Relojes modernos

«En la Fábrica de Relojes Waltham, las sencillas máquinas manuales se han combinado ahora y se han creado cientos de otras nuevas por valor de muchos cientos de miles de dólares. Todas interconectadas, forman, por así decirlo, un vasto organismo mecánico. Un único motor de vapor distribuye su potencia, mediante árboles de transmisión, entre todo un conjunto de talleres similares, con el resultado de un ritmo de producción de un reloj cada tres minutos. La perfección y la uniformidad conseguidas son tales que, de una vez y para siempre, quedan anticuados todos los métodos de producción anteriores.»

Talento femenino

«En nuestra práctica como abogados de patentes se nos ha requerido a menudo preparar solicitudes para mujeres inventoras. A quienes se muestran escépticos sobre su aptitud para producir algo más que un bizcocho o un bordado podemos decirles que los inventos para los que ellas solicitan patentes a través de nuestra agencia suelen ser, por el carácter práctico y la adaptación y elección de los medios para servir a un fin determinado, del todo equiparables a los inventos de los hombres.»

El tamaño de un átomo

«El famoso físico William Thomson se ha ocupado en unos cálculos muy interesantes a fin de estimar el tamaño de los átomos basándose en el fenómeno de la atracción capilar (el trabajo realizado para vencer la fuerza contráctil de las pompas de jabón), en la teoría cinética de los gases y en las leyes de la dinámica óptica. Ha llegado a la conclusión de que los diámetros de las moléculas gaseosas, o átomos de los gases elementales, miden 0,00000002017 milímetros. Según él, si ampliáramos una gota de agua hasta el tamaño de la Tierra, y ampliáramos en la misma proporción cada molécula, estas serían, aun así, más pequeñas que una bola de críquet.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVII, N.º 23, 8 DE DICIEMBRE DE 1917

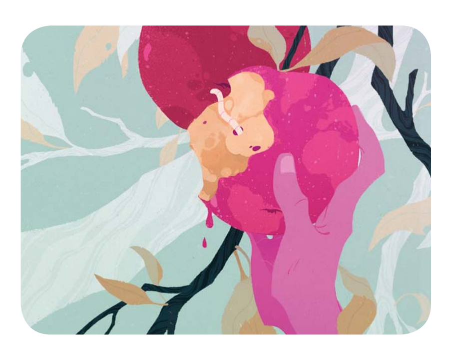


EVOLUCIÓN

El ascenso de los robles

Andrew L. Hipp, Paul S. Manos y Jeannine Cavender-Bares

¿Cómo ha logrado este género de árboles dominar los bosques del hemisferio boreal?



ECONOMÍA

Las alternativas al PIB

Joseph Stiglitz

La obsesión por el producto interior bruto ha tenido efectos negativos sobre el medio y la felicidad y salud de las personas. Los economistas abogan por un indicador financiero alternativo.

MEDICINA

Avances en la terapia génica para enfermedades raras

Lydia Denworth

Desdeñado durante mucho tiempo, un tratamiento que actúa sobre el ARN está cosechando resultados espectaculares.

SOSTENIBILIDAD

El cuello de botella de la biomasa

Eric Toensmeyer y Dennis Garrity

Las estrategias para reducir el dióxido de carbono dependen de un volumen de restos de árboles, pastos y cultivos superior al que el planeta puede acumular.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	**Extranjero**
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Fabio Teixidó: *Apuntes* y *Ha nacido un planeta*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *Los secretos de un superviviente antártico*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes* y *Crean materia cuántica en un laboratorio en órbita*; Pedro Pacheco: *Vinculan un gen neandertal con la percepción del dolor*; Ignacio Navascués: *Las vías imprevistas del aprendizaje*; Lorenzo Gallego: *La conquista agrícola de Europa*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Neutrinos ocultos* y *Las matemáticas a vista de pájaro*; Javier Grande: *Preservar el cielo nocturno*; J. Vilardell: *El vuelo oceánico de las arañas* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España